

**Formalismen, Simulation und Potenziale
eines nutzungsdaueroptimierenden
Zuverlässigkeitskonzepts**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau
der Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Krischan Wolters
aus
Essen

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Söffker
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
Tag der mündlichen Prüfung: 16.05.2008

Für Dani und Anouschka!

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik an der Universität Duisburg-Essen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker, der diese Arbeit anregte und wissenschaftlich betreut hat. Ich danke ihm ebenfalls für die vielen anregenden und kontroversen fachlichen sowie nicht fachlichen Gespräche.

Ebenfalls möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bertram Bertsche dafür danken, das Zweitgutachten für meine Arbeit angefertigt zu haben.

Darüberhinaus möchte ich sämtlichen Kollegen am Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik für die gemeinsame Zeit und die kollegiale Zusammenarbeit und Unterstützung danken. Für die schöne, freundschaftliche Atmosphäre während unserer gemeinsamen Zeit bedanke ich mich insbesondere bei Herrn Dr.-Ing. Keiwan Kashi, Herrn Dr.-Ing. Idriz Krajcin, Herrn Dr.-Ing. Elmar Ahle, Herrn Dipl.-Ing. Frank Heidtmann, Frau Dipl. Math. Svenja Kirchenkamp sowie Herrn Dipl.-Ing. Kai Dettmann, Herrn Markus Özbek, M. Sc. und Frau Yan Liu, M. Eng.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Dani Gläser, meiner Tochter Anouschka Wolters sowie meinen Eltern Maria und Henning Wolters. Bei ihnen möchte ich mich ganz besonders für ihre Unterstützung, ihre Geduld und ihren Ansporn bedanken.

Essen, im Juni 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufbau der Arbeit	5
2	Definitionen	8
3	Grundlagen	10
3.1	Verteilungsdichten und Zuverlässigkeitskenngrößen	10
3.1.1	Dichtefunktion	10
3.1.2	Verteilungsformen	12
3.1.3	Zuverlässigkeitskenngrößen	16
3.1.4	Zuverlässigkeitsvorhersage	18
3.2	Lebensdauerprognose	21
3.2.1	Verfahren und Methoden	21
3.2.2	Lebensdauermodelle	23
3.2.3	Schadensakkumulationshypothesen	30
3.3	Technische Diagnose	43
3.3.1	Signalbasierte Verfahren	44
3.3.2	Modellbasierte Verfahren	49
4	Safety and Reliability Control Engineering Konzept – SRCE-Konzept	57
4.1	Phase Eins: Konfigurations- und Optimierungsphase	59
4.2	Phase Zwei: Anwendung	61
4.3	Bisherige Arbeiten und ähnliche Ansätze	63
5	Modellbildung und Simulation	67
5.1	Umsetzung	69
5.1.1	Anforderungen an das Lebensdauermodell im SRCE-Konzept	69
5.1.2	Lebensdauerberechnung im SRCE-Konzept	71
5.1.3	Nutzungsdauer- und Zuverlässigkeitskenngrößenoptimierung .	77
5.2	Numerische Simulation	83
5.2.1	Lebensdauermodell	83
5.2.2	Lebensdauerberechnung	87
5.2.3	Prognoseannahmen	89
5.2.4	Simulationsergebnisse	90
6	Zusammenfassung und Ausblick	119
6.1	Neue wissenschaftliche Erkenntnisse	120
6.2	Mögliche weiterführende Forschungsansätze	121
	Literaturverzeichnis	123

Abbildungsverzeichnis

3.1	Verteilungsdichte der Normalverteilung	13
3.2	Verteilungsdichte der Lognormalverteilung	15
3.3	Verteilungsdichte der Exponentialverteilung	16
3.4	Verteilungsdichte der Weibullverteilung	17
3.5	Schematische Darstellung eines Lebensdauermodells als Lebensdauer- kennlinie	23
3.6	Wöhlerlinie	29
3.7	Schematischer Vergleich zwischen Wöhlerlinie und Gaßnerlinie	30
3.8	Miner-Modifikationen	34
3.9	Schema des Paritätsraumverfahrens [nach Frank, 1994]	50
3.10	Schema des Paritätsraumverfahrens im Zustandsraum [nach Isermann, 1997]	51
3.11	Schema der Diagnose mit Hilfe der Parameterschätzung [nach Frank, 1996]	51
3.12	Struktur eines Ausgangsbeobachters	53
3.13	Struktur eines Zustandsbeobachters	54
3.14	Auswertemöglichkeiten bei Anwendung eines PI-Beobachters	55
4.1	Aufbau des Safety and Reliability Control Engineering Konzepts, Phase Eins	59
4.2	SRCE-Konzept, Zweite Phase	62
5.1	Software-Agenten in Phase Eins des SRCE-Konzepts	67
5.2	Software-Agenten in der Anwendungsphase des SRCE-Konzepts	69
5.3	Notwendige Parameter der Lebensdauerkennlinie	70
5.4	Stress-Strength-Interferenzmodell	73
5.5	Iterativer Algorithmus der Advanced Second-Moment Method	76
5.6	Geometrische Interpretation des Hasofer-Lind-Zuverlässigkeitsindex . .	77
5.7	Bestimmung der prognostizierten Nutzungsdauer	79
5.8	Bestimmung der prognostizierten Zuverlässigkeitskenngröße	80
5.9	Extremtrajektorie der weiteren Zuverlässigkeitskenngröße	82
5.10	Regelkreis der prädiktiven modellbasierten Regelung	82
5.11	Lebensdauermodell nach [Shimokawa u. Hamaguchi, 1987]	84
5.12	Darstellung der Approximation von N_i und s_{N_i}	86
5.13	Geplante Beanspruchungsverläufe und Trajektorie der Zuverlässig- keitskenngröße	92
5.14	Vergleich der geplanten Beanspruchungsverläufe mit den veränderten Beanspruchungsverläufen	94
5.15	Vergleich der Ergebnisse bei einem positiven Driftverhalten im Bean- spruchungsverlauf zu einem Verlauf ohne Driftverhalten	95
5.16	Ergebnisse der Prognose 1, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}	96
5.17	Ergebnisse der Prognose 1, Ausfallwahrscheinlichkeit beim Erreichen von N_{Soll}	97

5.18	Ergebnisse der Prognose 2, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}	98
5.19	Ergebnisse der Prognose 2, Ausfallwahrscheinlichkeit beim Erreichen von N_{Soll}	99
5.20	Ergebnisse der Prognose 3, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}	100
5.21	Ergebnisse der Prognose 4, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}	101
5.22	Ergebnisse der Prognose 4, Ausfallwahrscheinlichkeit beim Erreichen von N_{Soll}	101
5.23	Ergebnisse der Prognose 5, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}	102
5.24	Ergebnisse der Prognose 5, Ausfallwahrscheinlichkeit beim Erreichen von N_{Soll}	102
5.25	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf A nach Begrenzungsfall I und II	105
5.26	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf B nach Begrenzungsfall I und II	106
5.27	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf C nach Begrenzungsfall I und II	107
5.28	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf D nach Begrenzungsfall I und II	108
5.29	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf E nach Begrenzungsfall I und II	109
5.30	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf F nach Begrenzungsfall I und II	110
5.31	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf A ohne Driftverhalten	113
5.32	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf B ohne Driftverhalten	114
5.33	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf C ohne Driftverhalten	115
5.34	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf D ohne Driftverhalten	116
5.35	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf E ohne Driftverhalten	117
5.36	Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf F ohne Driftverhalten	118

Tabellenverzeichnis

3.1	Belastungsarten	22
5.1	Parameter der Lognormalverteilungen von N_i	85
5.2	Empirische Erwartungswerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten	85
5.3	Parameter der Näherungslösung nach (5.1) mit $l = 1$	86
5.4	Zu erwartende Ausfallwahrscheinlichkeit $F_{N_{\text{Soll}}}$ und maximale Nutzungsdauer $N_{Z_{\text{krit}}}$ bei veränderten Beanspruchungsverläufen	93
5.5	Gewählte Prognosevarianten	103

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben und Abkürzungen

\mathbf{A}	Systemmatrix
a	Parameter
B	Beanspruchung
\mathbf{B}	Eingangsmatrix
B_D	Dauerbeanspruchbarkeit
B_{eff}	Effektivwert der Beanspruchung
B_G	Beanspruchbarkeit
B_L	Maximale Beanspruchung (darf zum Erreichen von N_{Soll} nicht überschritten werden)
B_{max}	Maximalbeanspruchung
B_{min}	Minimalbeanspruchung
b	Parameter
C	Scheitelfaktor, Crest-Faktor
\mathbf{C}	Ausgangsmatrix
$\text{Cov}(,)$	Kovarianz zweier Zufallsgrößen
c	Parameter
D, \mathbf{D}	Akkumulierte Schädigung
\mathbf{D}	Differenziationsfilter
D_A	Akkumulierte Schädigung während Rissausbreitungsphase
D_E	Akkumulierte Schädigung während Rissentstehungsphase
\mathbf{D}_P	Schädigung der Prognose
D_{Struk}	Gesamtschaden aus den Eigenwerten der Steifigkeitsmatrix
D_λ	Schädigungsindikator des Eigenwerts λ der Steifigkeitsmatrix
D^*, \mathbf{D}^*	Maximale, kritische Schädigung
\mathbf{D}_L^*	Maximale Schädigung bei Beanspruchung B_L
d, \mathbf{d}	Schädigungsinkrement
\mathbf{d}	Unbekannte Eingänge
\mathbf{d}_L	Schädigungsinkrement (verursacht durch Beanspruchung B_L)
\mathbf{d}_P	Schädigungsinkrement der Prognose
$E()$	Erwartungswert einer Zufallsgröße
E	Elektrische Belastung
E_A	Aktivierungsenergie
$\text{Expo}()$	Exponentialverteilung
$F()$	Verteilungsfunktion, Ausfallwahrscheinlichkeit
$F^N()$	Verteilungsfunktion der äquivalenten Normalverteilung
F_{krit}	Kritische Ausfallwahrscheinlichkeit
$F_{N_{\text{Soll}}}$	Ausfallwahrscheinlichkeit bei $N = N_{\text{Soll}}$
$F_{N_{\text{Soll}}}$	Ausfallwahrscheinlichkeit bei $N = N_{\text{Soll}}$
$f()$	Verteilungsdichtefunktion
$f^N()$	Verteilungsdichtefunktion der äquivalenten Normalverteilung
$G_F()$	Übertragungsfunktion des Filters
$G_M()$	Übertragungsfunktion des Modells

$G_{\text{Ps}}()$	Übertragungsfunktion des Prozesses
$g()$	Allgemeine Funktion
g_{P}	Prognosefunktion, Prognosemodell
\mathbf{H}	Verstärkungsmatrix
h	Materialstärke
i	Laufvariable
J	Stromdichte
j	Laufvariable, imaginäre Einheit
K	Proportionalitätsfaktor
k, l	Parameter
k_{B}	Boltzmann-Konstante
L	Belastung
$\text{LN}()$	Lognormalverteilung
M	Betriebsweise
m	Kennliniensteigung
$M_k()$	Statistisches Moment k -ter Ordnung
$\text{N}()$	Normalverteilung
N, \mathbf{N}	Nutzungsdauer
N_{D}	Nutzungsdauer beim Übergang vom Bereich begrenzter Nutzungsdauer zum Bereich unendlicher Nutzungsdauer
N_{exp}	Deterministisch experimentell bestimmte Nutzungsdauer
N_{L}	Maximale Nutzungsdauer (bei weiteren Beanspruchungen der Höhe B_{L})
N_{P}	Maximale Nutzungsdauer (Annahme, dass Prognose ab der ersten Nutzung gilt)
N_{soll}	Soll-Nutzungsdauer
$N_{\mathcal{Z}_{\text{krit}}}$	Nutzungsdauer bei $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}_{\text{krit}}$
$N_{\mathcal{Z}_{\text{krit}}}$	Nutzungsdauer bei $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}_{\text{krit}}$
n, \mathbf{n}	(Anzahl an) Nutzungen
$n_{\text{eq}}^{\mathcal{Z}}$	Nutzungszeitpunkt der Prognose, äquivalent zur Zuverlässigkeitskenngröße $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}_i$
\mathbf{n}_{f}	Verbleibende Nutzungen bis zum Ausfall
n_{max}	Anzahl an Nutzungen bei B_{max}
N_{rech}	Rechnerisch bestimmte Nutzungsdauer
n_u	Kontrollhorizont
\mathbf{p}	Vektor der physikalischen Koeffizienten
\mathbf{Q}	Hilfsmatrix
\mathbf{Q}_{B}	Beobachtbarkeitsmatrix nach Kalman
q	Anzahl der berücksichtigten Vorbeanspruchungen in einer Prognose
R	Spannungsverhältnis
$R()$	Überlebenswahrscheinlichkeit
r, \mathbf{r}	Residuum
RH	Relative Feuchte
R_{m}	Zugfestigkeit
$R_{y_1 y_2}$	Kreuzkorrelationskoeffizient

R_{yy}	Autokorrelationskoeffizient
S	Signalmodell
s	Komplexe Frequenz
$s_{\mathbf{X}}$	Empirische Standardabweichung der Zufallsgröße \mathbf{X}
$s_{\mathbf{X}}^2$	Empirische Varianz der Zufallsgröße \mathbf{X}
\mathbf{T}	Lebensdauer
T_p	Periodendauer
t	Zeit
U	Elektrische Spannung
u	Systemeingang
\mathbf{u}	Eingangsvektor
\mathbf{u}_F	Vektor des mehrfach differenzierten Eingangssignals \mathbf{u}
$V()$	Varianz einer Zufallsgröße
V	Verlustfunktion
v	Schnittgeschwindigkeit
$VK()$	Variationskoeffizient einer Zufallsgröße
$W()$	Weibullverteilung
\mathbf{W}	Matrix zur Residuenerzeugung
WV	Wigner-Ville-Verteilung
w	Netzweite
x	Variable
\mathbf{x}	Zustandsvektor
x_β	β -Punkt
y	Signal, Systemausgang
\mathbf{y}	Ausgangsvektor
y_{eff}	Effektivwert des Signals y
\mathbf{y}_F	Vektor des mehrfach differenzierten Ausgangssignals \mathbf{y}
y_M	Modellausgangsgröße
y_{max}	Maximalwert des Signals y
y_{min}	Minimalwert des Signals y
Z	Zuverlässigkeitskenngröße
\mathbf{Z}	Grenzzustandsfunktion
Z_{eq}^n	Zuverlässigkeitskenngröße der Prognose, äquivalent zur Nutzung $n = n_i$
Z_{krit}	Kritische Zuverlässigkeitskenngröße
Z_L	Grenzwert der Zuverlässigkeitskenngröße zum Erreichen von N_{Soll}
$Z_{P, N_{\text{Soll}}}$	Zuverlässigkeitskenngröße (beim Erreichen von N_{Soll} unter Annahme, dass Prognose ab der ersten Nutzung gilt)

Mathematische Akzente

$\hat{}$	Geschätzte bzw. prognostizierte Größe
$\bar{}$	Arithmetischer Mittelwert, empirischer Erwartungswert
\prime	Standardnormal transformierte Größe

Griechische Buchstaben

α	Exponent in Lebensdauermodellen
----------	---------------------------------

β	Zuverlässigkeitsindex
β_{HL}	Hasofer-Lind-Index
β_x	Exponent des Lebensdauermodells x
Δ_x	Absolute Abweichung
ϵ	Dehnung
$\Delta\epsilon$	Zyklische Dehnungsamplitude
$\Phi()$	Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung
$\phi()$	Verteilungsdichtefunktion der Standardnormalverteilung
$\Gamma()$	Gammafunktion
γ	Gewichtungsfaktor
γ_1	Schiefe
γ_2	Wölbung, Kurtosis
η	Formparameter der Weibullverteilung, Ausfallsteilheit
$\boldsymbol{\vartheta}$	Parametervektor
λ	Parameter der Exponentialverteilung, Ausfallrate, Eigenwert
μ	Lageparameter der Normalverteilung
μ_{LN}	Streuungsparameter der Lognormalverteilung
ν	Frequenz
ν_{g}	Grenzfrequenz
π	Faktor zur Modifikation der Ausfallrate
σ	Streuungsparameter der Normalverteilung
σ_{LN}	Lageparameter der Lognormalverteilung
$\sigma_{\mathbf{X}}$	Standardabweichung der Zufallsgröße \mathbf{X}
τ	Skalierungsparameter der Weibullverteilung, Charakteristische Lebensdauer
θ	Temperatur
ϖ	Kreisfrequenz
Ω	Ereignisraum
ω	Ereignis aus Ω
Ξ	Eyring-Modellparameter zur Beschreibung des Einflusses einer nicht thermischen Belastung L auf die Lebensdauer
ξ	Eyring-Modellparameter zur Beschreibung des temperaturabhängigen Einflusses einer nicht thermischen Belastung L auf die Lebensdauer
$\boldsymbol{\psi}$	Datenvektor
Ψ	Wavelet

Zahlenmengen

\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen

1 Einleitung

Die Lebensdauer einer technischen Einheit hängt stark von der Art ihrer Nutzung ab. Verschiedene Nutzungsweisen führen zu unterschiedlich ausgeprägten Beanspruchungen. Die Nutzungsdauer beschreibt als Teilmenge der Lebensdauer die Dauer der Einsetzbarkeit einer technischen Einheit unter Erfüllung einer oder mehrerer geforderter Kriterien wie Sicherheit, Funktionalität oder Qualität. Wird eine (mechanische, elektronische, hydraulische oder anders geartete) technische Einheit unter extremen Belastungen wie hohen Kräften, hohen Temperaturen oder hohen Spannungen eingesetzt, so führen diese Belastungen zu einer Schwächung bestimmter Eigenschaften der Einheit. Diese Schwächungen können in Form von veränderten, unerwünschten Materialeigenschaften oder auch in Form von Schädigungen wie Rissen, Brüchen, Steifigkeitsverlusten etc. auftreten. Als Folge nimmt die weitere mögliche Belastbarkeit einer solchen Einheit ab. Die maximal mögliche Nutzungsdauer der geschwächten Einheit ist geringer als die einer weniger stark belasteten Einheit. Mit dem Erreichen der maximalen Nutzungsdauer ist ein weiterer Einsatz der Einheit nicht mehr möglich, da ein oder mehrere der oben aufgeführten Kriterien nicht mehr ausreichend erfüllt werden können. Der Ausfall der Einheit wird somit durch das Nichterfüllen der geforderten Kriterien definiert. Wie oben bereits erwähnt, resultieren aus den Nutzungs- und Einsatzbedingungen bestimmte Belastungen, die eine Schwächung bzw. Schädigung der Einheit zur Folge haben. Kann die belastungsbedingte Schädigung frühzeitig erkannt werden, so sind Maßnahmen, die eine gezielte Änderung der Nutzungs- oder Einsatzbedingungen bewirken, in der Lage, die maximale Nutzungsdauer gezielt zu erhöhen und den frühzeitigen Ausfall einer Einheit zu vermeiden.

1.1 Motivation

Die Ausnutzung der maximal möglichen Lebens- oder Nutzungsdauer eines technischen Systems oder einer bestimmten kritischen Komponente des Systems erlangt immer größere Bedeutung. Aus wirtschaftlichen oder sicherheitstechnischen Gründen sind Betreiber von technischen Anlagen oftmals gezwungen, die Anlage oder bestimmte Komponenten der Anlage bis zu ihrer maximal möglichen Nutzungsdauer einzusetzen. Diese Forderung kann nur erfüllt werden, wenn Kenntnisse über den aktuellen Zustand dieser Komponenten bezüglich ihres Ausfallverhaltens vorliegen. Zusätzlich wird das Wissen über die Möglichkeit benötigt, diesen Endpunkt der Nutzung durch geeignete Maßnahmen entsprechend zu beeinflussen.

Zeigt es sich, dass es bei einer Einheit in absehbarer Zukunft mit einer unvermeidbaren hohen Wahrscheinlichkeit zu einem Ausfall kommen wird, so können verschiedene Motive zur Vermeidung dieses Ereignisses vorliegen. Als Beispiel sei hier das zwingende Erreichen eines bestimmten Zeitpunktes genannt, an dem Instandhaltungsmaßnahmen an der Einheit möglich sind. Gründe hierfür können der physische Zugang zu der Einheit sein, der nur zu einem bestimmten Zeitpunkt möglich ist oder die Gewährleistung einer Planungs- und Vorbereitungszeit für die Instandhaltungsmaßnahmen. Es ist ebenfalls denkbar, dass ein zeitlich hinausgeschobener Stillstand

kostenminimierend ist oder eine höhere Sicherheit für Mensch, Maschine und Umwelt darstellt. Als Beispiel sei hier das Abschalten einer Kraftwerksturbine genannt. Der Zeitpunkt des Abschaltens sollte so gewählt sein, dass

- die Instandhaltung zeitminimal abläuft,
- der Funktionsverlust durch andere Systeme abgefangen werden kann,
- keine zusätzliche Schädigung der Maschine zu befürchten ist und
- die Kosten möglichst gering ausfallen.

Ein anderes Beispiel sind Systeme, die nicht permanent erreichbar sind, wie Raumsonden, Satelliten oder autonome Unterseeboote. Hier muss das System erst eine bestimmte (Teil-)Mission beenden, bevor es für Instandhaltung, Rekonfiguration oder ähnliche Maßnahmen verfügbar ist. Gleiches gilt für Systeme, die kein *Fail-safe* Verhalten aufweisen, also bei einem Ausfall nicht direkt einen sicheren Zustand einnehmen können, wie beispielsweise Luftfahrzeuge.

Die üblichen Maßnahmen, um einen Ausfall einer Komponente während ihrer vorgesehenen Nutzungsdauer zu vermeiden, sind vielfältig.

Ein Ansatz besteht in der Auslegung einer Komponente entsprechend bestimmter Belastungsprofile. Selbst wenn die Annahmen zur Festlegung der Profile sehr konservativ getroffen werden, können die realen Belastungen erheblich von diesen Annahmen abweichen. Das Resultat ist, dass die Komponente Beanspruchungen erfährt, für die sie eventuell nicht ausgelegt wurde. Als Beispiel sei hier der Straßenbahntyp *Combino* der Firma Siemens genannt. Im Jahr 2004 kam es zu einer Rückrufaktion, von der über 400 Straßenbahnen betroffen waren, die Risse im Bereich der Dachbefestigung und der Türen aufwiesen. Diese sicherheitsrelevanten Schäden traten bereits nach einem Bruchteil der üblichen Nutzungsdauer von Straßenbahnen auf. Durch eine neue Bauweise traten während des Betriebs der Bahn unerwartete Kräfte und Schwingungen im Wagenkasten auf. Die Auslegung der Konstruktion erfolgte für Kräfte, die nur ein Drittel so groß sind, wie die real aufgetretenen Kräfte. Für die Schwingungsfrequenz erfolgte die rechnerische Auslegung nur für ein Sechstel der tatsächlich auftretenden Frequenz. Die Folge war, dass die Firma Siemens zur Behebung der Schäden 170 Experten abzog und zusätzlich Rückstellungen in Höhe von 300 Millionen Euro bildete [Strassmann, 2004].

Bei elektronischen Komponenten wird oft das Verfahren des *Burn in*, auch *Heat soaking* genannt, angewendet. Hierbei werden die Einheiten während oder am Ende des Herstellungsprozesses einem längeren Dauerbetrieb unter hoher Belastung ausgesetzt. Auf diese Weise können Einheiten, die zu Frühausfällen neigen, rechtzeitig erkannt und aussortiert werden. Akkumuliert sich der Schädigungseffekt erst mit zunehmender Nutzung, so ist er mit diesem Test nicht nur nicht aufspürbar, die Belastungen während des Tests würden zu einer Vorschädigung der geprüften Einheit beitragen.

Bei Konstruktionen, bei denen es nicht auf Leichtbauweise und die Einsparung von Material ankommt, erfolgt die Dimensionierung wichtiger Komponenten unter Zuhilfenahme eines Sicherheitsfaktors. Dies soll die Funktionalität des Systems im

Fälle des Auftretens von extremen Überlasten gewährleisten. Diese Maßnahme der Überdimensionierung kommt nicht für alle Systeme in Frage, wie z. B. für Automobile, Luftfahrzeuge oder die Ausleger von mobilen Systemen. Zudem ist sie mit erhöhten Kosten für Material und Energie zum Bewegen der zusätzlichen Massen verbunden.

Die Zuverlässigkeit von Komponenten wird vor Beginn ihrer Nutzung auf der Basis von Experimenten berechnet. Für die Systemzuverlässigkeit wird zusätzlich Wissen über die Struktur des Systems benötigt. Das Maß der Zuverlässigkeit wird durch bestimmte Kennzahlen dargestellt [siehe hierzu beispielsweise Meyna u. Pauli, 2003]. Solange die Bedingungen, unter denen die Experimente durchgeführt wurden mit den Bedingungen, unter denen die Komponente eingesetzt wird übereinstimmen oder durch validierte Verfahren entsprechend transformiert werden können, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die numerischen Annahmen zur Berechnung der Zuverlässigkeit mit den Ergebnissen aus dem Feldeinsatz übereinstimmen, groß. Weichen die Bedingungen voneinander ab, muss das quantitative Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse überdacht werden. Die ermittelten Größen sind üblicherweise Funktionen der Zeit, was bedeutet, dass die Änderung der Zuverlässigkeit einer Einheit nach diesen Kenngrößen nur von der Zeit und nicht von der Art der Nutzung abhängig ist. Sobald aber die Beanspruchung den Ausfallmechanismus der Einheit beeinflusst, ist die Aussagefähigkeit dieser Kenngrößen für operative Planungen in Frage zu stellen.

Um den Ausfall durch Fehler (unerwünschte Funktionsausprägungen einer Einheit) zu vermeiden, werden Einheiten mit einer Fehlerdiagnose ausgestattet [beispielhaft in Gao u. Patton, 2003; Schwarte u. a., 2003; Börner u. Isermann, 2003]. Die Ziele der Fehlerdiagnose sind das Auftreten eines Fehlers im System zu erkennen, diesen Fehler zu identifizieren und seine Ursache aufzudecken. Eine Aussage über die Auswirkungen des Fehlers bezüglich der weiteren Nutzung und speziell über die Dauer der weiteren Nutzung liefern die bekannten Verfahren [Isermann, 1997; Gertler, 1998; Frank u. a., 2000] nicht.

Wie intakt eine Einheit ist, kann mit Maßnahmen des *Health Monitoring* ermittelt werden [Boller u. Biemans, 1997]. Komplementär ausgedrückt, ermöglichen diese Maßnahmen die Bestimmung des Schadenszustands einer Einheit. Die gewonnenen Aussagen sind zumeist in der Art, dass die Anzahl, die Lage und die Größe von beispielsweise Rissen oder Ablösungen in einer Struktur erfasst werden. Aussagen über die Dauer der weiteren möglichen Nutzbarkeit der Einheit sowie über mögliche Maßnahmen zur Reduzierung des weiteren Schadenszuwachses sind auf Grund dieser Informationen meist nur schwer möglich.

Bei Einheiten mit hohen Anforderungen an die Sicherheit oder Verfügbarkeit werden Redundanzen zur Erzeugung von Fehlertoleranz geschaffen. Diese können aus zusätzlichen Einheiten bestehen, die beim Ausfall der Primäreinheit deren Funktion nach dem gleichen oder einem anderen Wirkprinzip übernehmen (strukturelle homogene oder diversitäre Redundanz). Funktionelle Redundanzen sind ebenfalls möglich. Dies bedeutet, dass bestimmte Funktionen mehrfach vorhanden, jedoch im Normalbetrieb entbehrlich sind [siehe beispielsweise Koren u. Krishna, 2007]. Aus Gewichts- und vor allem aus Kostengründen wird diese Variante nur in sehr sicherheitskritischen Fällen angewendet (z. B. im Flugzeugbau). Ebenfalls ist zu beden-

ken, dass die Redundanzen üblicherweise Alterungserscheinungen unterliegen. Bei heißen Redundanzen, die parallel zur Primäreinheit ständig im Betrieb sind, kommen zudem Abnutzungserscheinungen hinzu. Wird die Redundanz als dynamische Redundanz ausgelegt, also erst in Betrieb genommen, nachdem die Primäreinheit ausgefallen ist, so muss gewährleistet sein, dass die redundante Einheit zu diesem Zeitpunkt voll funktionsfähig ist. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass die Aktivierung einer kalten Redundanz evtl. mit einer zeitlichen Verzögerung versehen ist, wenn die Einheit beispielsweise erst hochgefahren werden muss.

Auch und gerade bei neueren Ansätzen zur Gestaltung von Systemen und Realisierung von Funktionen unter Einsatz der Mechatronik und Adaptronik stellt sich die Frage nach den aktuellen, individuellen Zuverlässigkeitseigenschaften dieser Systeme. Unter Mechatronik wird die räumliche und funktionale Integration von Ansätzen aus dem Maschinenbau, der Elektrotechnik, der Informationstechnik und der Sicherheitstechnik zur Generierung von Systemen und Funktionen verstanden. Üblicherweise bestehen mechatronische Systeme aus einem mechanischen, hydraulischen oder ähnlichem Basissystem. Dieses System wird durch Sensoren, Informationsverarbeitungseinheiten und Aktoren zur Erfüllung seiner (zusätzlichen) Funktionen ergänzt. Der Begriff Adaptronik beschreibt einen Bereich der Technik zur Schaffung von Systemen, bestehend aus Multifunktionswerkstoffen wie Piezokeramiken oder Formgedächtnis-Legierungen. Diese Werkstoffe übernehmen gleichzeitig eine strukturgebende, eine sensorische sowie eine aktorische Funktion im System. Mechatronische Systeme sowie die Einbindung mechatronischer Bauteile in moderne technische Systeme wie die Integration bzw. Realisierung unterschiedlicher Funktionalitäten in integrierte Strukturen z. B. durch Multifunktionsmaterialien ermöglichen eine räumlich und funktional kompakte Bauweise sowie neuartige technische Lösungen. Die aus den neuartigen Materialverbünden, den kombinierten Belastungen sowie den neuartigen Realisierungen sensorischer und aktorischer Funktionen sowie deren Zusammenspiel resultierende erhöhte Komplexität derartiger Systeme muss bei der Betrachtung der Zuverlässigkeit dieser Systeme berücksichtigt werden. Fällt in einem mechatronischen System eine Komponente aus, so kann dies, bedingt durch den hohen Grad der Integration sämtlicher Komponenten, direkt zu einem vollständigen Verlust der Gesamtsystemfunktionalität führen. Für adaptronische Systeme gilt dies bei einem Verlust der Funktionalität bzw. Funktion einer adaptronischen Komponente im verstärkten Maße, da hier der Grad der Integration, bedingt durch die Übernahme mehrerer Funktionen innerhalb einer Komponente höher ist. Nur wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Systemausfalls minimiert werden kann, können sich mechatronische und adaptronische Strukturen in wirtschaftlich bewährten bzw. in sicherheitskritischen Anwendungen (z. B. Luft- und Raumfahrt) qualifizieren. Um diesen Funktionsausfall zu vermeiden, muss unter anderem der Zustand der relevanten Komponenten hinsichtlich ihres Ausfallverhaltens bekannt sein. Da dies neben einigen Anfangsbedingungen primär von der aktuellen und vergangenen Beanspruchung der Komponente abhängt, ist das Wissen über den Zusammenhang zwischen der Beanspruchung, der zu erwartenden Lebensdauer und der aktuellen Zuverlässigkeit einer Komponente bzw. eines Systems von großer Bedeutung. Ist die Komponente erhöhten Belastungen ausgesetzt, muss geklärt werden, ob eine weitere

ausfallfreie Nutzung der Komponente möglich ist oder ob Instandhaltungsmaßnahmen wie Reparaturen oder Austausch erforderlich sind. Hat die Komponente eine sicherheitskritische Funktion, muss diese während der gesamten Nutzung dauerhaft gewährleistet sein. Ist diese Funktion während einer definierten Nutzungsdauer, wie einem bestimmten Prozess, einem Manöver, einem Takt oder Ähnlichem bis zum Ende der Nutzungsdauer nicht innerhalb eines bestimmten Maßes der Funktionserfüllung garantiert und kann die Nutzung nicht unterbrochen werden, ist der Einsatz eines Notlaufkonzepts zur Aufrechterhaltung der sicherheitskritischen Funktion denkbar.

Das im Rahmen dieser Arbeit zum ersten Mal vollständig mathematisch sehr detailliert durchdachte und simulierte Safety and Reliability Control Engineering-Konzept [Rakowsky u. Söffker, 1997; Söffker, 2000] ist ein Ansatz zur Lösung der oben erwähnten Aufgabenstellung. Mit Hilfe eines Lebensdauer- und Schädigungsmodells wird eine aktuelle Kenngröße bestimmt. Diese bietet eine Möglichkeit zur Abschätzung des Systemzustands bezüglich eines Ausfalls. Da diese Größe direkt von den vorhandenen aktuellen und vergangenen Beanspruchungen der Einheit abgeleitet wird, ist die Aussage speziell für die betrachtete Einheit gültig. Somit können unterschiedlich genutzte Einheiten in Abhängigkeit ihrer individuellen Betriebsweisen und bezüglich ihres individuellen Ausfallverhaltens beurteilt werden.

Darüber hinaus wird der Zusammenhang zwischen dem Ausfallkriterium und der Beanspruchung formalisiert. In einem Umkehrschluss folgt daraus, dass die gezielte Änderung der weiteren Beanspruchungen den Ausfallzeitpunkt hinauszögern und die Nutzungsdauer verlängern kann. Da dies üblicherweise mit einer Leistungsreduzierung verknüpft ist, bietet sich die Methode vorwiegend für den zeitlich exakt kalkulierbaren Notlaufbetrieb einer Einheit an.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Kapitel.

Das erste Kapitel beinhaltet diese Einleitung.

Im zweiten Kapitel werden relevante Begriffe definiert. Diese Definitionen sind notwendig, da der Gebrauch einiger Begriffe von Fachgebiet zu Fachgebiet unterschiedlich ausfallen kann. Das Kapitel soll helfen, die erwähnten Begriffe in dem richtigen Kontext zu sehen.

In Kapitel 3 werden Grundlagen erläutert. Der erste Abschnitt fasst elementare Definitionen und Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung zusammen. Da der Kern dieser Arbeit stochastische Größen und probabilistische Berechnungen beinhaltet, soll dem Leser mit geringem bis keinem Vorwissen über Probabilistik und Stochastik eine kleine Hilfestellung gegeben werden. Nach der Vorstellung der Dichtefunktion als ein Modell zur Beschreibung von Zufallsgrößen werden einige spezielle Dichtefunktionen, die im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden, inklusive ihrer zugehörigen Parameter genauer beschrieben. Im Anschluss folgt die Beschreibung von bestimmten probabilistischen Kenngrößen, welche die Zuverlässigkeitseigenschaften einer betrachteten Einheit quantitativ beschreiben. Diese Größen werden demzufolge Zuverlässigkeitskenngrößen genannt. Der letzte Unterabschnitt befasst sich mit den

klassischen Methoden, die Zuverlässigkeit einer Einheit unter bestimmten Betriebsbedingungen vorherzusagen. Dieser Abschnitt dient vor allem dazu, den gravierenden Unterschied zwischen der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Methode und den klassischen Methoden zu verdeutlichen. Die Vielzahl der vorgestellten Vorhersagemethoden zeigt, dass eine einheitliche Methode nicht existiert, die verschiedenen Ansätze aber gewisse Ähnlichkeiten bezüglich der Annahmen und Vorgehensweisen aufzeigen. Im zweiten Abschnitt erfolgt eine Übersicht über Modelle zur Beschreibung der Lebensdauer einer Einheit in Abhängigkeit von unterschiedlichen Belastungen und Beanspruchungen. Diese Auswahl von verschiedenen Modellen soll zeigen, welche Aspekte bei allen Modellen gemeinsam auftreten. Die Anwendung des Safety and Reliability Control Engineering-Konzepts kann somit fachübergreifend erfolgen. Es zeigt sich, dass für jede Beanspruchungsart und jede Einheit das jeweilige Lebensdauermodell oder zumindest die zugehörigen Parameter individuell zu bestimmen sind. Im letzten Unterabschnitt erfolgt eine Übersicht verschiedener Ansätze, die Akkumulation von nutzungsbedingten Beanspruchungen und den daraus resultierenden Schädigungsanteil rechnerisch zu bestimmen. Somit soll eine möglichst genaue Beschreibung des Systemzustands bezüglich eines definierten Schadensereignisses ermöglicht werden. Auch hier dient die Auflistung einiger Ansätze aus der Forschung der Verdeutlichung der Flexibilität des Safety and Reliability Control Engineering-Konzepts, da eine Komponente dieses Konzepts aus einer beliebigen, zur vorhandenen Beanspruchung und zum vorherrschenden Schadensakkumulationsprozess passenden Akkumulationshypothese besteht. Ob eine der vorgestellten Hypothesen oder ein komplett neu erstellter Ansatz gewählt wird, ist zweitrangig, soweit die Ergebnisse der Berechnung sich mit den Erfahrungswerten aus Feldbeobachtungen decken. Weiterhin wird mit Hilfe der Lebensdauermodelle und der Schadensakkumulationshypothesen verdeutlicht, warum es sich bei der Bestimmung der Lebensdauer auf der Basis empirischen Wissens um einen probabilistischen Prozess handelt. Der letzte Abschnitt zeigt verschiedene Diagnoseverfahren, die zum Erfassen der Beanspruchung einer Einheit eingesetzt werden können. Die Aussagekraft der Ergebnisse des Konzepts hängt stark von der Genauigkeit ab, mit der die relevanten Beanspruchungen erfasst werden können. Da die Beanspruchung gerade bei komplexeren Einheiten oder komplexeren Schädigungsmechanismen nicht immer eindeutig und direkt aus den (physikalischen) Mess-, Steuer- und Regelungssignalen bestimmt werden kann, werden hier Methoden und Verfahren aus dem Bereich der technischen Diagnose vorgestellt, die diese Erfassung der gesuchten Beanspruchungen ermöglichen.

Die Vorstellung des Safety and Reliability Control Engineering-Konzepts ist Kern von Kapitel 4. Das Konzept gliedert sich in zwei Phasen. Phase Eins ist Inhalt des ersten Abschnitts und beschreibt die Konfiguration und Optimierung der einzelnen Bestandteile des Konzepts. Die Optimierung kann vom Anwender selbst oder durch einen selbstlernenden Algorithmus erfolgen. Die zweite Phase beschreibt die Anwendung des Konzepts an einer Einheit im Betrieb. Der abschließende Abschnitt führt die bisherigen Arbeiten im Zusammenhang mit dem Safety and Reliability Control Engineering-Konzept auf und erläutert weitere Arbeiten, deren Zielsetzungen mit der des Safety and Reliability Control Engineering-Konzepts verwandt sind.

Das fünfte Kapitel beschreibt die konkrete Umsetzung einiger Kernelemente des Konzepts. Hierbei werden die mathematischen Zusammenhänge zur Beschreibung des Lebensdauer- und Akkumulationsmodells aufgeführt und verknüpft. In einem weiteren Unterabschnitt erfolgt die probabilistische Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngröße aus den Ergebnissen der Modelle bei gegebenen Beanspruchungsgrößen. Ansätze zur Optimierung der Nutzungsdauer unter Einhaltung einer vorgegebenen Zuverlässigkeitskenngröße folgen im nächsten Unterabschnitt. Hierbei wird neben dem Prinzip eines adaptiven Grenzwertes die modellbasierte prädiktive Regelung als möglicher Ansatz vorgestellt. Im zweiten Abschnitt wird die vorgestellte Verfahrensweise an Hand eines numerischen Beispiels genauer erläutert. Nach der Vorstellung des Lebensdauermodells und den Annahmen zur Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngröße werden verschiedene Prognosevarianten erörtert. Die numerischen Ergebnisse der unterschiedlichen Prognosen liefern Informationen über die optimale Wahl des Prognoseverfahrens zur Nutzungsdaueroptimierung. Die Ergebnisse dieses Optimierungsprozesses werden im letzten Unterabschnitt analysiert.

Das Kapitel 6 beendet die Arbeit mit einer Zusammenfassung des Themas und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Forschungsarbeiten zur Klärung offener Fragestellungen und zur Optimierung der in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensweise.

2 Definitionen

Im Folgenden werden Begriffe, die im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung sind, genauer definiert.

- *Ausfall*
Beendigung der Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion zu erfüllen [nach IEV 191-4, 1995]. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur abnutzungsbedingte Ausfälle betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Ausfall ist direkt abhängig von der Nutzungsdauer bzw. der Zahl der Arbeitsvorgänge sowie der Höhe der aus den Nutzungen bzw. den Arbeitsvorgängen resultierenden Beanspruchungen. (Im Gegensatz zu altersbedingten Ausfällen, deren Eintreten mit ablaufender Zeit zunimmt, wobei diese Zeit unabhängig von der Nutzungsdauer ist.)
- *Ausfall-/Versagenskriterium*
Grenzwert, Grenzbereich oder Ausprägung eines Merkmals einer Einheit, bei dessen Erreichen oder Überschreiten der Ausfall der Einheit eintritt.
- *Beanspruchung*
Die physikalisch/chemische Reaktion einer Einheit auf eine Belastung, wie z. B. Spannungen, Dehnungen, Änderungen der werkstofftechnischen Eigenschaften etc.
- *Belastung*
Die von außen auf eine Einheit wirkenden Einflüsse verstanden, wie z. B. Temperatur, Kraft, Feuchte etc.
- *Einheit*
Technisches Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, Betriebsmittel, Funktionseinheit oder System
- *Funktionsfähigkeit*
Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Anwendungsbedingungen für ein gegebenes Zeitintervall zu erfüllen [nach IEV 191-2, 1995]
- *Funktionszuverlässigkeit*
Als Funktionszuverlässigkeit einer Einheit wird die Überlebenswahrscheinlichkeit gegenüber Ausfällen/Versagensereignissen bezeichnet, die eine/mehrere definierte Funktion/-en aufheben oder unzulässig beeinträchtigen [nach VDI 4004, 1986].
- *Lebensdauer*
Zeitspanne vom Bereitstellen einer Einheit bis zum Erreichen eines abnutzungs- oder alterungsbedingten Ausfallkriteriums

- *Nutzung*
Einsatz einer Einheit unter vollständiger oder teilweiser Erbringung der geforderten Funktion
- *Nutzungsdauer*
Zeitspanne vom Beginn der Nutzung einer Einheit bis zum Erreichen eines abnutzungsbedingten Ausfallkriteriums
- *Zuverlässigkeit*
Entgegen den Definitionen nach [IEV 191-2, 1995], [DIN EN 60300-1, 2004] und [DIN EN ISO 8402, 1995] bezieht sich der Begriff Zuverlässigkeit im Rahmen dieser Arbeit nicht auf die Verfügbarkeit einer Einheit und ihre Einflussfaktoren, sondern dient lediglich als Kurzform des Begriffs Funktionszuverlässigkeit und seiner Bedeutung.

3 Grundlagen

Dieses Kapitel dient dazu,

- in die mathematischen, methodischen und inhaltlichen Hintergründe und Zusammenhänge der in Kapitel 4 und folgenden aufgeführten Erläuterungen kurz einzuführen,
- die aus anderen Forschungsgebieten bekannten Methoden und Verfahren, die im Rahmen des Konzepts eingesetzt werden können, kurz vorzustellen und
- die Unabhängigkeit des in Kapitel 4 vorgestellten Konzepts von verschiedenen Fachrichtungen und deren eigenen Ansätzen bzgl. der Lebensdauermodelle (Abschnitt 3.2.2) und der Schadensakkumulation (Abschnitt 3.2.3) aufzuzeigen.

3.1 Verteilungsdichten und Zuverlässigkeitskenngrößen

In diesem Abschnitt werden einige Grundlagen zu Wahrscheinlichkeitsdichten bzw. Verteilungsdichtefunktionen und Zuverlässigkeitskenngrößen erläutert, die im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung sind.

3.1.1 Dichtefunktion

Die Zuverlässigkeitstheorie beschäftigt sich in erster Linie mit Zufallsgrößen, dargestellt durch fett hervorgehobene Großbuchstaben ohne Serifen, wie Lebensdauern \mathbf{T} etc. Diese Zufallsgrößen sind reelle Zufallsvariablen einer Funktion $\mathbf{T} : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$. Dies bedeutet, dass jedem Ereignis ω aus der Ereignismenge Ω eine reelle Zahl zugeordnet werden kann. Zur Charakterisierung dieser stochastischen Größen werden unterschiedliche Dichtefunktionen $f(t)$ genutzt. Diese Funktionen ermöglichen es, eine probabilistische Aussage darüber zu treffen, dass eine Zufallsgröße \mathbf{T} einen Wert t innerhalb eines Intervalls dt annimmt. Die Ableitung der Verteilungsdichtefunktion wird als (kumulative) Verteilungsfunktion $F(t)$ bezeichnet. Mit ihrer Hilfe kann eine Aussage darüber getroffen werden, dass eine Zufallsgröße \mathbf{T} einen Wert kleiner oder gleich t annimmt:

$$F(t) = \Pr(\mathbf{T} \leq t), \quad \text{mit } t \in \mathbb{R}. \quad (3.1)$$

Die Verteilungsfunktion besitzt die folgenden Eigenschaften:

- 1) Die Verteilungsfunktion F ist monoton steigend:

$$t_1 < t_2 \Rightarrow F(t_1) \leq F(t_2) \quad \forall t_1, t_2 \in \mathbb{R}$$

- 2) Die Verteilungsfunktion F ist rechtsseitig stetig:

$$F : D \rightarrow \mathbb{R} \text{ stetig in } t_0 \iff \lim_{t \rightarrow t_0} F(t) = F(t_0)$$

- 3) Der links- bzw. rechtsseitige Grenzwert der Verteilungsfunktion F beträgt Null bzw. Eins:

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} F(t) = 0 \quad \cap \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$$

- 4) Die Ableitung der Verteilungsfunktion F ist die Verteilungsdichtefunktion f :

$$f = F' = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3.2)$$

Jede Verteilungsfunktion kann durch ihre Momente $M_k(x)$ charakterisiert werden. Das statistische Moment k -ter Ordnung bezüglich x ist definiert als

$$M_k(x) := \int_{-\infty}^{\infty} (t - x)^k f(t) dt,$$

wobei

$$E(\mathbf{T}) = \int_{-\infty}^{\infty} t f(t) dt \quad (3.3)$$

der Erwartungswert der Zufallsgröße \mathbf{T} ist. Der Erwartungswert wird als Lageparameter einer Verteilung bezeichnet und stellt denjenigen Wert dar, der sich bei ausreichend großer Zahl von Wiederholungen des zugrunde liegenden Zufallsexperiments als Mittelwert der tatsächlich auftretenden Ergebnisse ergibt.

Somit gilt

$$M_k(x) = E[(\mathbf{T} - x)^k].$$

Wird x durch den Erwartungswert $E(\mathbf{T})$ ersetzt, ergibt sich für $k = 2$ das zentrale Moment zu

$$M_2(E(\mathbf{T})) = E[(\mathbf{T} - E(\mathbf{T}))^2] = V(\mathbf{T}), \quad (3.4)$$

welches als Varianz V bezeichnet wird. Die Varianz ist ein Streuungsmaß einer Zufallsgröße und beschreibt den Durchschnitt der Abweichungsquadrate vom Erwartungswert eines statistischen Merkmals. Die wichtigsten Rechenregeln im Zusammenhang mit Erwartungswerten und Varianzen sind die Regeln für die Summe von Zufallszahlen,

$$\begin{aligned} E\left(\sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i\right) &= \sum_{i=1}^n E(\mathbf{T}_i) \quad \text{und} \\ V\left(\sum_{i=1}^n \mathbf{T}_i\right) &= \sum_{i=1}^n V(\mathbf{T}_i) + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{Cov}(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j) \end{aligned} \quad (3.5)$$

mit $\text{Cov}(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$ als Kovarianz der Zufallsgrößen \mathbf{T}_i und \mathbf{T}_j sowie die Regeln für die lineare Transformation

$$\begin{aligned} E(a\mathbf{T} + b) &= a E(\mathbf{T}) + b \quad \text{und} \\ V(a\mathbf{T} + b) &= a^2 V(\mathbf{T}). \end{aligned} \quad (3.6)$$

Üblicherweise ist eine Zufallsgröße nur durch eine bestimmte Zahl i von Versuchsergebnissen x_i (Realisationen) gegeben. Erwartungswert und Varianz können in diesem Fall nicht nach den Gleichungen (3.3) und (3.4) berechnet werden. Die empirische Bestimmung der Kennwerte beruht auf der Formel für das arithmetische Mittel

$$\bar{x} = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i x_j \quad (3.7)$$

als empirisches Gegenstück zum Erwartungswert sowie auf der Formel der empirischen Varianz

$$s_{\mathbf{X}}^2 = \frac{1}{i-1} \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x})^2 .$$

Da die Einheit der Varianz das Quadrat der Einheit der zu Grunde liegenden Zufallsgröße darstellt, wird oft zur besseren Anschauung die Standardabweichung σ benutzt. Diese ist definiert als positive Quadratwurzel der Varianz

$$\sigma_{\mathbf{X}} = \sqrt{V(\mathbf{X})} \quad (3.8)$$

bzw. in der Form der empirischen Standardabweichung s als

$$s_{\mathbf{X}} = \sqrt{s_{\mathbf{X}}^2} . \quad (3.9)$$

Die relative Abweichung einer Zufallsgröße von ihrem Erwartungswert E wird als Variationskoeffizient VK bezeichnet und ist definiert als Quotient aus Standardabweichung und Erwartungswert,

$$VK(\mathbf{X}) = \frac{\sigma}{E(\mathbf{X})} \cdot 100 \% \quad \text{bzw.} \quad VK(\mathbf{X}) = \frac{s_{\mathbf{X}}}{\bar{x}} \cdot 100 \% . \quad (3.10)$$

3.1.2 Verteilungsformen

Im folgenden Abschnitt werden die hier relevanten Verteilungsformen näher erläutert.

Normalverteilung

- Verteilungsdichtefunktion: $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]$
- Verteilungsfunktion: $F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dx$
- Definitionsbereich: $(-\infty, \infty)$
- Parameter: Lageparameter μ und Streuungsparameter σ
- Erwartungswert: $E(\mathbf{X}) = \mu$

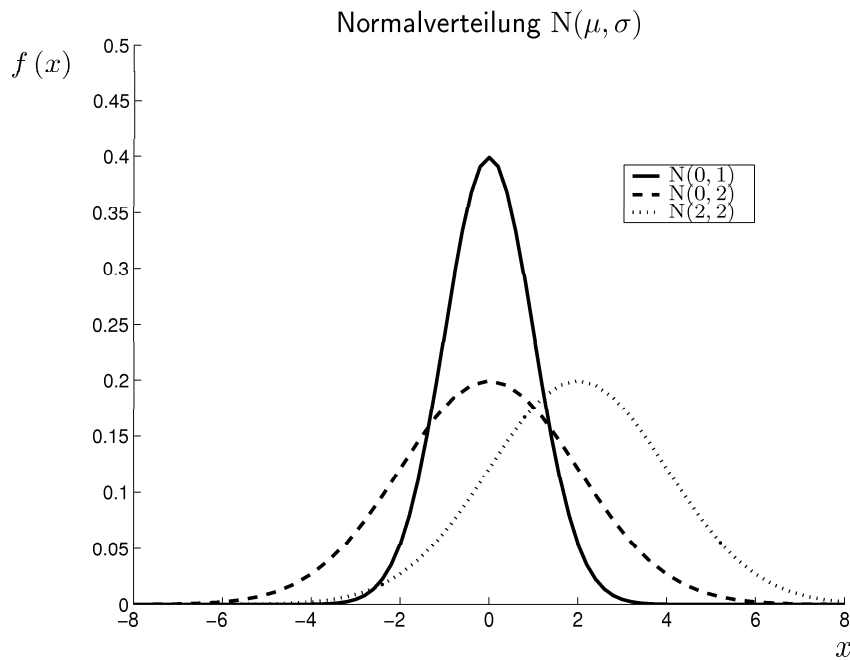


Abbildung 3.1: Verteilungsdichte der Normalverteilung

- Varianz: $V(\mathbf{X}) = \sigma^2$
- Notation einer normalverteilten Zufallsgröße: $\mathbf{X} \sim N(\mu, \sigma)$
(Hierbei steht „ \sim “ für „ist verteilt nach“.)
- Charakteristik:

Die Normalverteilung verhält sich, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, symmetrisch bezüglich des Lageparameters μ . Nach dem zentralen Grenzwertsatz folgt, dass eine Summe von i unabhängigen, identisch verteilten Zufallsgrößen für den Grenzwert $i \rightarrow \infty$ näherungsweise eine Normalverteilung annimmt. Für die Parameter $\mu = 0$ und $\sigma = 1$ ist die Normalverteilung normiert und wird als Standardnormalverteilung $\Phi(x) = N(0, 1)$ bezeichnet. Üblicherweise ist die Lösung von $\Phi(x)$ in Form von Tabellen in der Literatur sowie den meisten mathematischen Softwareprodukten vorhanden. Die Dichtefunktion der Standardnormalverteilung wird mit $\phi(x)$ bezeichnet. Die Verteilungsfunktion einer beliebigen, normalverteilten Zufallsvariable kann somit durch die Transformation in eine standardnormalverteilte Variable unter Zuhilfenahme der zugehörigen Tabellen gelöst werden.

Lognormalverteilung

- Verteilungsdichtefunktion: $f(x) = \frac{1}{\sigma_{\text{LN}} \sqrt{2\pi}} \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{(\ln(x) - \mu_{\text{LN}})^2}{2\sigma_{\text{LN}}^2} \right]$
- Verteilungsfunktion: $F(x) = \frac{1}{\sigma_{\text{LN}} \sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{\ln(x) - \mu_{\text{LN}}}{2\sigma_{\text{LN}}} \right] dx$

- Definitionsbereich: $[0, \infty)$
- Parameter: μ_{LN} und σ_{LN}
- Erwartungswert:

$$E(\mathbf{X}) = \exp\left(\mu_{\text{LN}} + \frac{1}{2}\sigma_{\text{LN}}^2\right) \quad (3.11)$$

- Varianz:

$$V(\mathbf{X}) = \exp(2\mu_{\text{LN}} + \sigma_{\text{LN}}^2) [\exp(\sigma_{\text{LN}}^2) - 1] \quad (3.12)$$

- Notation einer lognormalverteilten Zufallsgröße: $\mathbf{X} \sim \text{LN}(\mu_{\text{LN}}, \sigma_{\text{LN}})$
- Charakteristik:

Die Lognormalverteilung (logarithmische Normalverteilung) beschreibt die Verteilungsdichte einer Zufallsgröße \mathbf{X} , wenn $\ln(\mathbf{X})$ normalverteilt ist. Im Gegensatz zur Normalverteilung besitzt die Lognormalverteilung eine nichtsymmetrische, rechtsschiefe Verteilungsdichte, wie in Abbildung 3.2 dargestellt. Zudem ist der Definitionsbereich der Lognormalverteilung beschränkt auf \mathbb{R}^+ . Zwischen der Lognormalverteilung und der Normalverteilung besteht folgender Zusammenhang:

- Ist eine Zufallsgröße \mathbf{X} normalverteilt mit den Parametern μ und σ , so ist $\ln(\mathbf{X})$ lognormalverteilt mit den Parametern $\mu_{\text{LN}} = \mu$ und $\sigma_{\text{LN}} = \sigma$,

$$\mathbf{X} \sim N(\mu, \sigma) \Rightarrow \ln(\mathbf{X}) \sim \text{LN}(\mu, \sigma) .$$

- Ist eine Zufallsgröße \mathbf{X} lognormalverteilt mit den Parametern μ_{LN} und σ_{LN} , so ist $\ln(\mathbf{X})$ normalverteilt mit den Parametern $\mu = \mu_{\text{LN}}$ und $\sigma = \sigma_{\text{LN}}$,

$$\mathbf{X} \sim \text{LN}(\mu_{\text{LN}}, \sigma_{\text{LN}}) \Rightarrow \ln(\mathbf{X}) \sim N(\mu_{\text{LN}}, \sigma_{\text{LN}}) .$$

Durch Umformen und Einsetzen der Gleichungen (3.11) und (3.12) können die Parameter der Lognormalverteilungen aus den Parametern der Normalverteilung nach

$$\sigma_{\text{LN}}^2 = \ln(1 + \text{VK}^2) \quad (3.13)$$

und

$$\mu_{\text{LN}} = \ln(\mu) - \frac{1}{2} \ln\left[\frac{\mu^2 + \sigma^2}{\mu^2}\right] \quad (3.14)$$

berechnet werden.

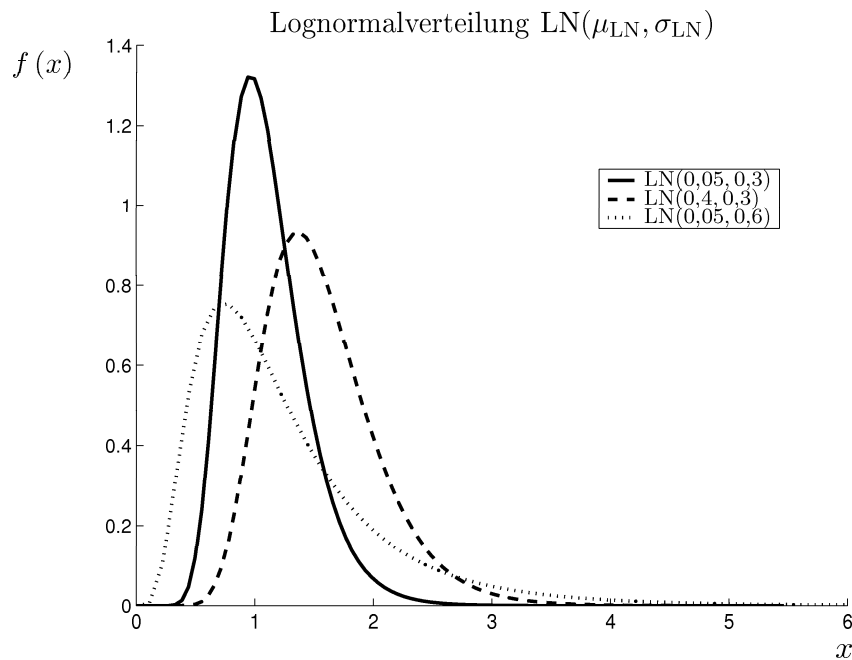


Abbildung 3.2: Verteilungsdichte der Lognormalverteilung

Exponentialverteilung

- Verteilungsdichtefunktion: $f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$
- Verteilungsfunktion: $F(x) = 1 - \exp(-\lambda x)$
- Definitionsbereich: $[0, \infty)$
- Parameter: Ausfallrate λ
- Erwartungswert: $E(\mathbf{X}) = \frac{1}{\lambda}$
- Varianz: $V(\mathbf{X}) = \frac{1}{\lambda^2}$
- Notation einer exponentiellverteilten Zufallsgröße: $\mathbf{X} \sim \text{Expo}(\lambda)$

– Charakteristik:

Die Exponentialverteilung kennt keine „Vergangenheit“, dies bedeutet, dass die Ausfallrate über der Zeit konstant bleibt. Sie ist daher das klassische Verteilungsmodell zur Repräsentation des Ausfallverhaltens elektronischer Bauteile. Typische Verläufe für die Verteilungsdichte einer Exponentialverteilung sind in Abbildung 3.3 auf der nächsten Seite dargestellt.

Weibullverteilung

- Verteilungsdichtefunktion: $f(x) = \frac{\eta}{\tau} \left(\frac{x}{\tau}\right)^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\tau}\right)^\eta\right]$
- Verteilungsfunktion: $F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\tau}\right)^\eta\right]$

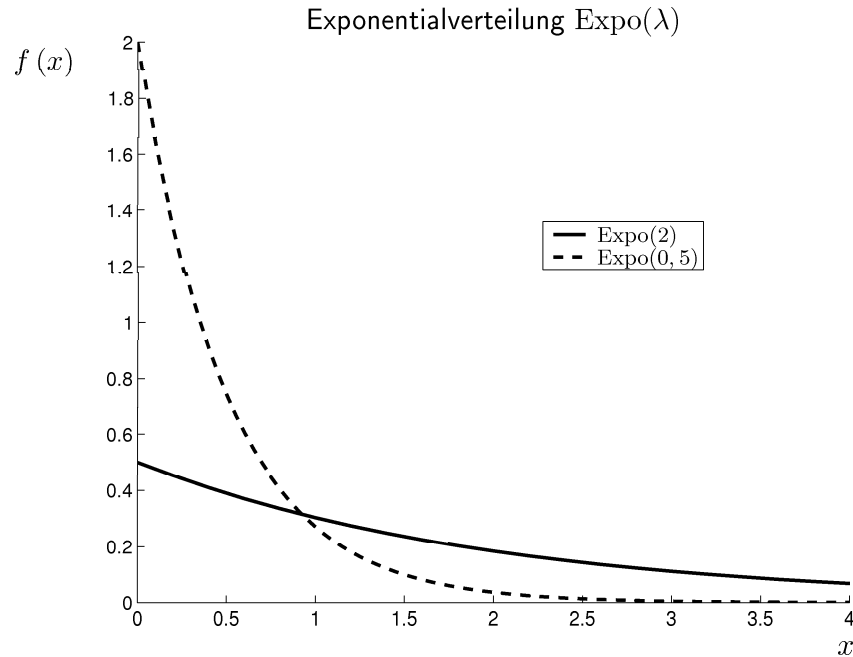


Abbildung 3.3: Verteilungsdichte der Exponentialverteilung

- Definitionsbereich: $[0, \infty)$
- Parameter: Charakteristische Lebensdauer τ und Ausfallsteilheit η
- Erwartungswert: $E(\mathbf{X}) = \tau \Gamma\left(1 + \frac{1}{\eta}\right)$
wobei Γ die Gammafunktion bezeichnet
- Varianz: $V(\mathbf{X}) = \tau^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\eta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\eta}\right)^2 \right]$
- Notation einer weibullverteilten Zufallsgröße: $\mathbf{X} \sim W(\tau, \eta)$
- Charakteristik:
Wie in Abbildung 3.4 zu sehen ist, entspricht eine Weibullverteilung $W(\tau, 1)$ einer Exponentialverteilung $\text{Expo}(1/\tau)$, während eine Weibullverteilung mit $1,5 \leq \eta \leq 3$ sowie $3,1 \leq \eta \leq 3,6$ einer Lognormalverteilung gleicht.

3.1.3 Zuverlässigkeitskenngrößen

Zuverlässigkeitskenngrößen werden genutzt, um eine quantitative Abschätzung über die Zuverlässigkeitseigenschaften einer Einheit treffen zu können. Einige Zuverlässigkeitskenngrößen wurden in Abschnitt 3.1.1 beschrieben. Dies sind beispielsweise die *Ausfallwahrscheinlichkeit* (3.1), die *Ausfalldichte* (3.2) und die *Mean Time To Failure* (MTTF) (3.3), die den Erwartungswert der Lebensdauer darstellt.

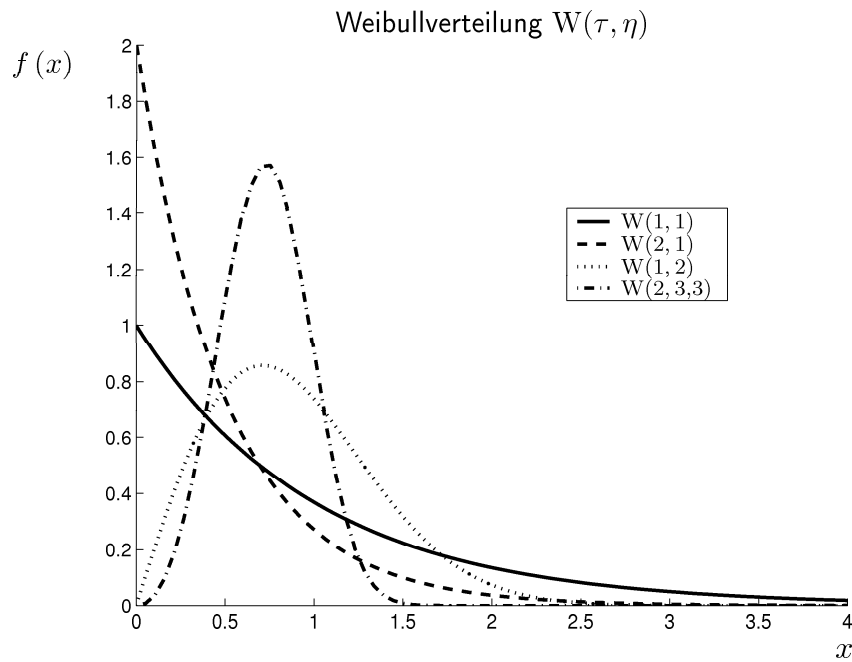


Abbildung 3.4: Verteilungsdichte der Weibullverteilung

Neben der Ausfallwahrscheinlichkeit, der Ausfalldichte und der MTTF können weitere Zuverlässigkeitskenngrößen genutzt werden. Diese können sein,

- die *Überlebenswahrscheinlichkeit*

$$R(t) = 1 - F(t), \quad (3.15)$$

- die *Ausfallrate*

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

sowie weitere Größen [Meyna u. Pauli, 2003; Bertsche u. Lechner, 2004].

Die Überlebenswahrscheinlichkeit (3.15) ist das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$, es gilt $F(t) + R(t) = 1$.

Aus der Ausfallrate $\lambda(t)$ folgt mit

$$\lambda(t) \Delta t \approx \Pr(t < \mathbf{T} \leq t + \Delta t | \mathbf{T} > t)$$

eine Abschätzung für die bedingte Ausfallwahrscheinlichkeit, dass die betrachtete Einheit innerhalb des Betrachtungszeitraums Δt ausfällt, wenn sie bis zum Zeitpunkt t nicht ausgefallen ist.

3.1.4 Zuverlässigkeitsvorhersage

Die klassischen Zuverlässigkeitsvorhersagen umfassen Verfahren, die eine probabilistische Aussage über die Zuverlässigkeit einer Einheit vor Beginn der Inbetriebnahme ermöglichen. Hierbei wird versucht, unterschiedliche Faktoren, wie die zu erwartende Belastung und die Qualität der Einheit, die Umgebungsbedingungen und ähnliche Einflüsse im Hinblick auf das Ausfallverhalten der Einheit ausreichend zu berücksichtigen.

Für einen realen Einsatz können nach den klassischen Ansätzen der Zuverlässigkeitsvorhersage keine konkreten Aussagen über die Zuverlässigkeit und damit das Ausfallverhalten der Einheit gemacht werden. Diese Form der Zuverlässigkeit wird als Feldzuverlässigkeit bezeichnet und berücksichtigt die tatsächlich auftretenden Belastungen und Beanspruchungen. Bei der klassischen Zuverlässigkeitsvorhersage wird vielmehr unter Zuhilfenahme von statistisch aufbereitetem Datenmaterial versucht, eine Aussage über die Zuverlässigkeit einer Komponente bei angenommenen Betriebs- und Einsatzbedingungen zu treffen. Zuverlässigkeitsvorhersagen werden aus diesem Grund in der Entwurfsphase einer Einheit eingesetzt, um verschiedene Entwurfskonzepte bezüglich ihrer Zuverlässigkeit beurteilen zu können.

Zuverlässigkeitsvorhersagen werden nach dem gegenwärtig Stand der Technik nach folgenden Normen durchgeführt [RAMS, 2004]:

- Die Vorhersage nach dem *Military Handbook-217* [MIL 217, 1995] (abgekürzt als *MIL-HDBK-217*) beruht auf empirisch ermittelten Ausfallraten elektromechanischer und elektronischer Bauteile des US-Militärs. Als Annahme wird eine exponentiellverteilte Lebensdauer gewählt (Abschnitt 3.1.2), wodurch die Systemzuverlässigkeit als einfache Addition der einzelnen Ausfallraten bestimmt werden kann. Hierbei wird eine durchschnittliche Belastung angenommen. Die Ausfallrate λ_{Equip} des Systems nach der Teilzähltechnik ergibt sich aus

$$\lambda_{\text{Equip}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{Teile}}} n_i (\lambda_g \pi_Q)_i .$$

Hierbei wird die Ausfallrate für n_{Teile} verschiedene Bauteilgruppen aus der Anzahl n_i der Bauteile einer Bauteilgruppe sowie der allgemeinen Ausfallrate λ_g für das jeweilige Bauteil bestimmt. Weiterhin wird ein Faktor π_Q für den Einfluss der Qualität des Bauteils berücksichtigt.

Die Ausfallrate λ_p eines Bauteils nach der Bauteilbelastungstechnik entspricht

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E .$$

Hierbei ergibt sich die konkrete Bauteilausfallrate als Produkt einer Basisausfallrate λ_b sowie der π -Faktoren für die Einsatztemperatur (π_T), elektrische Belastung (π_S), Art der Verbindungstechnik (π_C), Qualität (π_Q) und Umgebung (π_E).

- Die Verfahren nach dem *Telcordia Technologies Special-Report SR-332* (*Telcordia SR-332*) [Telcordia SR-332, 2001] sind den Verfahren nach MIL-HDBK-217 sehr ähnlich, beziehen sich aber auf Untersuchungen aus Fernmeldedaten. Im Allgemeinen werden bei dieser Vorgehensweise drei empirische Methoden unterschieden. Die Methode I entspricht weitestgehend der Teilzähltechnik nach MIL-HDBK-217, die Methode II berücksichtigt experimentelle Laborergebnisse und die Methode III schließt die Einbeziehung von Felddaten mit ein. Die Ausfallrate ergibt sich hierbei aus einer Blackbox Steady-state Ausfallrate

$$\lambda_{BB} = \lambda_G \pi_Q \pi_S \pi_T,$$

die selber wiederum ganz allgemein als Produkt einer allgemeinen Ausfallrate λ_G sowie entsprechender π -Faktoren besteht. Die Blackbox Ausfallrate kann durch Ergebnisse aus Laborversuchen oder Felddaten in eine Steady-state Ausfallrate λ_{SS} überführt werden. Im einfachsten Fall gilt $\lambda_{SS} = \lambda_{BB}$. Die Ausfallrate größerer Einheiten bzw. des gesamten Systems ergibt sich dann als Summe der einzelnen Steady-state Ausfallraten.

- Das Software-Tool *PRISM*® (Denson u. a. [2005]) basiert als kommerzielles Produkt auf zwei automatisierten Datenbanken für elektronische und nicht-elektronische Bauteile. Wie die anderen Verfahren beinhaltet es verschiedene, die Ausfallrate beeinflussende π -Faktoren. Dies sind Faktoren für die Bauteilherstellung, Frühausfälle, die Umwelt, den Entwurf, das Zuverlässigkeitswachstum, das Herstellungsverfahren, den System-Management-Prozess, das induzierte Verfahren, einen Null-Fehler-Prozess und Verschleiß. Darüber hinaus berücksichtigt *PRISM*® die Integration der Software-Zuverlässigkeit. Die Berechnung der Ausfallrate der einzelnen Bauteile unterscheidet sich je nach Bauteil. Ganz allgemein setzt sich die Ausfallrate aus der Summe mehrerer einzelner Ausfallraten zusammen. Dies sind neben einer Basisausfallrate spezielle Ausfallraten bedingt durch den Einfluss der Umwelt, der Verbindungsart, Überbeanspruchungen etc. Die einzelnen Ausfallraten können selber jeweils wieder mit verschiedenen π -Faktoren multipliziert werden, ähnlich den vorher genannten Verfahren. Die Ermittlung quantitativer Größen für die einzelnen Faktoren erfolgt über ein vom Benutzer zu bedienendes Fragen-Antworten-Interface.
- Bei der Zuverlässigkeitsvorhersage nach *DIN EN 61709* [DIN EN 61709, 1999] werden im Gegensatz zu den ersten vier Verfahren keine Umweltbedingungen berücksichtigt. Als ausfallbeeinflussende Faktoren werden lediglich elektrische Belastungen berücksichtigt. Die ermittelte Ausfallrate ist für gegebene Referenzbedingungen gültig, kann jedoch über Umrechnungsmodelle den tatsächlichen Bedingungen angepasst werden.
- Das Verfahren *Physik der Ausfälle (PoF)* [Pecht, 1990; Deckert, 1998] ist ein wissenschaftlicher deterministischer Ansatz, der versucht, die physikalischen Zusammenhänge und Effekte sämtlicher möglicher Ausfallarten als Ursache zu

verstehen und zu beschreiben. Es wird davon ausgegangen, dass die Lebensdauer eines elektronischen Produkts von der geringsten Lebensdauer sämtlicher Komponenten des Produkts abhängig ist. Es wird versucht, diese Komponente zu identifizieren und die geforderte Lebensdauer durch einen entsprechenden Entwurf zu überschreiten. Das Verfahren benötigt eine große Menge an Daten sowie aufwendige und komplizierte Untersuchungen. Anders als bei den übrigen Verfahren wird kein empirisches Ausfall-Modell zu Grunde gelegt.

- Das *IEEE Gold Book* [IEEE Std-493, 1991] bietet Daten für die Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Netzverteilungssystemen. Die Zuverlässigkeitsangaben erfolgen für unterschiedliche Arten der Netzausrüstung.
- In dem Handbuch *Nonelectronic Parts Reliability Data (NPRD-95)* [NPRD, 1995] sind Ausfalldaten von vorwiegend mechanischen und elektromechanischen Bauteilen gesammelt. Die Angaben berücksichtigen unterschiedliche Umweltbedingungen sowie unterschiedliche Qualitätsniveaus der Einheiten. Die angegebenen Ausfallraten sind ebenfalls Durchschnittswerte.
- Eine weitere Datensammlung, die sich vorwiegend mit mechanischen Bauteilen befasst, ist *NSWEC-98/LE31 - Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment* [NSWC, 1998]. Diese Sammlung von Daten enthält Ausfallraten für unterschiedliche mechanische Bauteile unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften, der konstruktiven Ausführung sowie der Abmessungen und der Einsatzbedingungen.

Als weitere Datensammlungen in dieser Richtung kann das *HRD5 - Handbook of Reliability Data* [HRD5, 1994] (entwickelt von der britischen Telekom) sowie die chinesische Norm *GJB/z 299B* [GJB/z 299B, 2001] (als chinesisches Pendant zum MIL-HDBK-217) genannt werden.

Allen Verfahren, bis auf *PoF*, ist gemeinsam, dass die rechnerische Vorhersage der Zuverlässigkeit aus gemittelten statistischen Größen erfolgt. In allen Fällen werden verschiedene Bedingungen bzgl. des Einsatzes sowie der Beschaffenheit durch (subjektive) Faktoren bzw. durch getroffene Annahmen hinzugezogen. Somit soll eine möglichst genaue und übertragbare Prognose der Zuverlässigkeit für die jeweiligen Baugruppen erfolgen. Es muss immer davon ausgegangen werden, dass die realen Bedingungen während der Nutzung des Systems von diesen Annahmen abweichen. Somit würde die Prognose zu einem verfälschten Ergebnis führen. Die Kenntnisse über die Beschaffenheit der Bauteile sind vor dem Einsatz der Komponenten hinreichend bekannt und können daher vor Beginn der Nutzung berücksichtigt werden. Hierbei gilt anzumerken, dass Faktoren wie Qualität, Abmessungen, Material etc. einer bestimmten Streuung unterliegen. In [Talmor, 1999] wird ein Ansatz für ein integriertes Zuverlässigkeitsvorhersagemodell vorgestellt, der in der Kombination verschiedener Informationen und Modelle zu einem Modell mit optimal angepassten Parametern besteht. Neben den oben erwähnten Normen werden konkretere Informationen über die Einheit sowie Ergebnisse eigener Testreihen in das Modell integriert. Ein Vergleich der Vorhersagen mit den Ergebnissen von Feldausfalldaten soll als Rückkopplung zur Verbesserung des Modells dienen. Die Kernidee besteht

allerdings weiterhin in einer Berechnung ähnlich der oben genannten Modelle, allerdings mit optimierten Parametern.

Die konkreten Einsatzbedingungen und die daraus resultierenden Belastungen sowie Beanspruchungen sind vor dem Einsatz einer Komponente nur ungenau vorherzusagen. Anstelle der Prognose der Zuverlässigkeit vor Einsatzbeginn wäre es daher sinnvoller, die Prognose während der laufenden Nutzung durchzuführen. Bei einer Online-Prognose könnte daher auf die realen aktuellen und vergangenen Belastungen bzw. Beanspruchung und Umgebungsbedingungen zurückgegriffen werden. Dies verbessert die Aussage- und Trefferqualität der Vorhersage wesentlich.

3.2 Lebensdauerprognose

Die möglichst exakte Bestimmung der Lebensdauer eines technischen Systems oder einer technischen Komponente besitzt einen immer höheren Stellenwert im Rahmen der Bestandsverwaltung und technischen Überwachung von Anlagen und Betriebsmittel sowie der Planung, Organisation und Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen an technischen Systemen, zusammenfassend als Asset-Managements bezeichnet. Ursachen hierfür sind:

1. Die Anforderungen an die Funktionszuverlässigkeit sicherheitskritischer Komponenten, um eine bestimmte sicherheitsrelevante Funktion ausüben zu können.
2. Die Verringerung von wartungsbedingten Stillstandszeiten sowie gleichzeitig die organisatorischen und finanziellen Maßnahmen zur Instandhaltung zu minimieren. Als mögliche Methoden seien die zuverlässigkeitsbasierte Instandhaltung (RCM: Reliability centered maintenance) oder die zustandsorientierte Instandhaltung erwähnt.
3. Eine Aussage über die weitere Einsetzbarkeit von genutzten Maschinen und Komponenten zu treffen. Diese Fragestellung ist besonders bei investitionsintensiven Maschinen und Komponenten von großem Interesse.

In dem folgenden Abschnitt erfolgt ein kurzer Überblick über die Methoden und Verfahren der Lebensdauerprognose, die je nach Quelle auch Verfahren und Methoden zur Lebensdauerberechnung genannt werden. Für eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Methoden und Verfahren, speziell für mechanisch belastete Komponenten, sei auf die gängigen Fach- und Lehrbücher verwiesen, insbesondere [Haibach, 2002; Schott, 1997; Schlottmann, 1995; Gnille, 1980].

3.2.1 Verfahren und Methoden

Jede technische Komponente ist im Laufe ihres Einsatzes bestimmten Belastungen und Alterungserscheinungen ausgesetzt. Die Belastungen können verschiedenen Ursprungs sein, wie beispielsweise mechanische Belastungen, elektrische Belastungen oder Belastungen aus der Umgebung. In Tabelle 3.1 ist ein Überblick über mögliche Belastungen gegeben. Dieser erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 3.1: Mögliche Belastungsarten

Kategorie	Belastungsart
Mechanisch	Schwingungen, Kriechen, Stöße, ...
Elektrisch	Power cycling, elektrische Felder, Stromdichte, ...
Umgebung	Temperatur, Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Radioaktivität, Salz und sonstige feine Partikel, aggressive Atmosphären, ...

Die Belastungen führen je nach Werkstoff und Bauteilbeschaffenheit der Komponente sowie je nach Vorhandensein weiterer überlagerter Belastungsarten zu unterschiedlichen Beanspruchungen. Diese äußern sich als Spannungen oder Dehnungen des Materials sowie in einer Änderung der mikroskopischen Materialstruktur und damit beispielsweise in den mechanischen oder elektrischen Materialeigenschaften.

Je nach Komponente führen die Beanspruchungen zu unterschiedlichen Schadensformen wie beispielsweise Materialermüdung, Verschleiß oder Korrosion. Das Ende der Lebensdauer einer Komponente wird je nach Einsatzzweck und Gegebenheit als Erreichen eines Versagens- oder Ausfallkriterium angegeben. Mögliche Kriterien können sein: Rissentstehung, Risslänge, Bruch, Steifigkeitsverlust, Fressen, Restfestigkeit, Delamination, Verschleißhöhe (kritische Materialstärken bzw. Materialabtrag), Korrosionshöhe (kritische Lochgröße etc.), Elastizitätsverlust, Änderung des Isolationswiderstands, Kontaktverlust, Änderung des thermischen Widerstands, Elektromigration, erhöhte Reibwerte, Maßabweichungen oder Ähnliches.

Diese Auflistung zeigt die Vielseitigkeit der möglichen Ausfallkriterien. Einige dieser Kriterien sind nur durch eine Prüfung der betroffenen Komponenten außerhalb des Gesamtsystems und nicht bei laufendem Betrieb zu ermitteln, während andere im System (in-situ) und/oder im Betrieb (online) überprüft werden können bzw. müssen.

Direkte und indirekte Messverfahren zur Ermittlung der Höhe der entsprechenden Ausfallkriterien einer Komponente in Strukturen sind unter anderem ein großer Bereich der Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet des *Structural Health Monitoring*. Hierbei werden bevorzugt Schäden an technischen Strukturen wie Luft- und Raumfahrzeugen sowie Bauwerken untersucht und bewertet. Die Untersuchungsmethoden lassen sich in zerstörende und zerstörungsfreie Methoden unterscheiden, wobei den zerstörungsfreien aus nahe liegenden Gründen der Vorzug zu geben ist. Zur Kategorie der zerstörungsfreien Methoden zur Schadensdetektion gehören beispielsweise Verfahren und Methoden der Ultraschalluntersuchungen, Radiografie, Schwingungsanalysen, Thermographie, Acousto-Ultrasonics, Laser Ultrasonics, Shearografie, Akustische Interferometrie sowie Lamb-Wellen Untersuchungen [Boller u. Biemans, 1997; Matthews, 1999]. Aktuelle Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet werden in den zweijährlich stattfindenden internationalen Konferenzreihen *International Workshop on Structural Health Monitoring* und *European Workshop on Structural Health Monitoring* sowie in der Zeitschriftenreihe *Structural Health Monitoring* [SHM, 2002] vorgestellt.

3.2.2 Lebensdauermodelle

Die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Beanspruchungshöhe und damit der Zeitpunkt, wann ein Ausfallkriterium unter einer bestimmten Beanspruchung erreicht wird, werden durch ein experimentell bestimmtes Modell ermittelt. Dieses Modell ist das Ergebnis von Lebensdauerversuchen eines Bauteils oder eines Werkstoffs. Bei diesen Versuchen werden definierte Proben unterschiedlich hohen Belastungen oder Beanspruchungen B_i mit $i = 1, 2, \dots, n$ bis zum Versagen bzw. bis zu einer bestimmten Lebensdauer als Abbruchkriterium ausgesetzt. Die unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus können konstant, periodisch wechselnd oder stochastisch auftreten. Für jede Beanspruchungsfolge werden mehrere Bauteilproben getestet, um die Streuung der Lebensdauer \mathbf{T} bzw. der Nutzungsdauer \mathbf{N} zu erfassen. Diese basiert auf stochastischen Einflussgrößen wie den Materialeigenschaften, dem Herstellungsprozess und weiteren Größen.

Die Streuung der Lebensdauer \mathbf{T} kann mit unterschiedlichen Verteilungsdichten beschrieben werden. Üblicherweise werden die Weibullverteilung sowie die Lognormalverteilung als Verteilungsmodelle (Abschnitt 3.1.2) eingesetzt.

Unter Einsatz einer Regressionsgeraden bzw. durch Verbinden der Mittelwerte der streuenden Messpunkte ergibt sich eine Kurve, die im doppelt logarithmischen Maßstab der Prinzipskizze in Abbildung 3.5 entspricht und allgemein Lebensdauerkennlinie genannt wird.

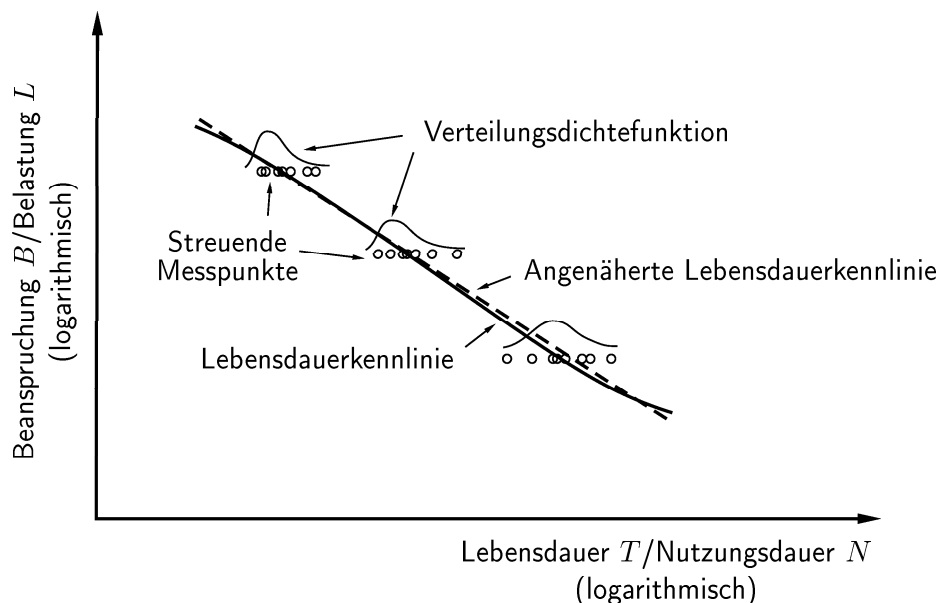


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung eines Lebensdauermodells als Lebensdauerkennlinie

In Abhängigkeit der pro Bauteil aufgetragenen Belastungshöhen sowie der Reihenfolge dieser Belastungen werden die Lebensdauerversuche wie folgt unterteilt:

1. *Einstufenversuche*, bei denen das Bauteil bis zum Erreichen des Versagenskriteriums mit einer konstanten Belastung beaufschlagt wird.

2. *Mehrstufenversuche*, bei denen das Bauteil mit mindestens n unterschiedlichen, aufeinander folgenden Belastungsstufen bis zum Erreichen des Versagenskriteriums betrieben wird. Die Dauer der i ($i = 1, \dots, n - 1$) Belastungsstufen ist fest vorgegeben, während die n -te Belastung bis zum Ausfall des Bauteils anhält.
3. *Betriebsfestigkeitsversuche*, bei denen das Bauteil mit einer möglichst betriebsnahen Folge unterschiedlicher Belastungen geprüft wird. Betriebsfestigkeitsversuche werden unterschieden in
 - *Programmversuche*, bei denen die Belastung aus einer sich wiederholenden Folge unterschiedlicher Belastungsniveaus konstanter Dauer besteht. Typische Standardlastfolgen für Programmversuche bei mechanischen Beanspruchungen sind beispielsweise TWIST für Tragflächen von Transportflugzeugen, FALLSTAFF für Tragflächen von Kampfflugzeugen, HELIX für Hubschrauber-Rotoren, WASH für Offshore Bauwerke, CARLOS für Pkw-Fahrwerksteile und WISPER/WISPERX für Turbinen in Windkraftanlagen.
 - *Betriebslastversuche*, bei denen die Belastungen bezüglich der Höhe und Dauer den Verteilungen der Belastungsniveaus und -dauern der im Betrieb erfassten Belastungen entspricht,
 - *Randomisierte Programmversuche*, bei denen sich die Belastung aus zufällig gewählten Belastungsprogrammen zusammen setzt und
 - *Random-Prozess Versuche*, bei denen die Belastung innerhalb vorgegebener Grenzen komplett nach einem Zufallsprozess zusammengestellt wird.

Je nach gewähltem Lebensdauerversuch werden unterschiedliche Lebensdauer kennlinien gewonnen. Dies zeigt die Abhängigkeit der Nutzungsdauer von der Höhe und Reihenfolge der Beanspruchungen.

Es gibt für verschiedene Beanspruchungs- und Belastungsarten unterschiedliche Lebensdauermodelle. Im Folgenden werden einige dieser Modelle vorgestellt.

Arrhenius-Modell

Das Arrhenius-Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen der Belastungsgröße Temperatur θ und der Lebensdauer T elektronischer Bauteile. Die Lebensdauer lässt sich hierbei nach

$$T = a \exp \left\{ \frac{E_A}{k_B \theta} \right\} \quad (3.16)$$

berechnen. Die Größe θ kennzeichnet die gemessene Temperatur in Kelvin zum Zeitpunkt des Ausfalls, k_B ist die Boltzmann-Konstante. Der Faktor a ist ein Skalierungsfaktor und E_A bezeichnet die Aktivierungsenergie, die vom Ausfallmechanismus und dem Material abhängt. Das Arrhenius-Modell wird erfolgreich zur Beschreibung von nichtmechanischen Ausfällen, die auf chemischen Reaktionen, Diffusions- oder Migrationsprozessen basieren, eingesetzt.

Eyring-Modell

Das Modell von Henry Eyring [Glasstone u. Eyring, 1941] erweitert den Ansatz des Arrhenius-Modells, indem neben thermischen Belastungen weitere Belastungsgrößen berücksichtigt werden können. Zur Berechnung der Lebensdauer nach dem Eyring-Modell wird die Gleichung

$$T = a\theta^\alpha \exp \left\{ \frac{E_A}{k_B\theta} + \left(\Xi_1 + \frac{\xi_1}{\theta} \right) L_1 + \left(\Xi_2 + \frac{\xi_2}{\theta} \right) L_2 \right\} \quad (3.17)$$

genutzt. Zu den Größen aus der Arrhenius Gleichung (3.16) beinhaltet die Gleichung des Eyring-Modells weitere Belastungen L_i , wie beispielsweise elektrische Spannungen oder andere nicht thermische Belastungen. Die Größen Ξ_i und ξ_i beschreiben den Einfluss der Temperatur θ (thermische Belastung) auf die weiteren nicht thermischen Belastungen L_i . Somit sind die Wechselwirkungen zwischen Temperatur und zusätzlichen Belastungsarten berücksichtigt.

Die Vorteile des Eyring-Modells sind:

- Berücksichtigung verschiedener Belastungsarten
- Beschreibung von Abnutzungs- und Ausfalleffekten

Demgegenüber stehen folgende Nachteile:

- Jede zusätzliche Belastungsgröße erweitert die Gleichung (3.17) um zwei weitere unbekannte Parameter.
- Der Einfluss vieler Parameter ist eher zweitrangig. Der erste Summand von Gleichung (3.17) entspricht bei $\alpha = 0$ der Gleichung (3.16) und beschreibt den Einfluss der Temperatur auf die Lebensdauer ebenfalls sehr genau. Bei fehlenden oder zu vernachlässigenden Wechselwirkungen zwischen der thermischen Belastung θ und den weiteren Belastungen L_i müssen die Größen Ξ_i und ξ_i nicht berücksichtigt werden.

Viele der weiteren aufgeführten Lebensdauermodelle basieren auf dem Eyring-Modell. In den meisten Fällen werden die Belastungen L_i durch eine entsprechende Funktion ersetzt und die für den jeweiligen Ausfallmechanismus nicht relevanten Parameter vernachlässigt.

Inverse Power Rule für elektrische Spannung

Das Modell der Inverse Power Rule für elektrische Spannung beschreibt den Einfluss der elektrischen Spannung U auf die Lebensdauer von Kondensatoren in der Form

$$T = aU^{-\beta_U} . \quad (3.18)$$

Dies ist eine vereinfachte Form des Eyring-Modells (3.17) unter der Annahme α, E_A und $\xi_1 = 0$ sowie $L_1 = \ln U$ und $\Xi_1 = -\beta_U$.

Exponentielles Spannungs-Modell

Für den Fall, dass der Einfluss der elektrischen Spannung U auf die Lebensdauer besser mit einem exponentiellen Modell beschrieben werden kann, wird die Gleichung

$$T = a \exp \{-\Xi U\} \quad (3.19)$$

genutzt. Ähnlich dem Arrhenius-Modell kennzeichnet a hier einen Skalierungsfaktor.

Temperatur-Spannungs-Modelle

Wenn die Temperatur und die elektrische Spannung berücksichtigt werden sollen, können als Vereinfachung von (3.17) die Gleichungen

$$\begin{aligned} T &= a \exp \left\{ \frac{E_A}{k_B \theta} \right\} U^{-\beta_U} \quad \text{bzw.} \\ T &= a \exp \left\{ \frac{E_A}{k_B \theta} \right\} \exp \{-\Xi U\} \end{aligned} \quad (3.20)$$

eingesetzt werden.

Temperatur-Feuchtigkeits-Modell

Das Modell nach Hallberg/Peck [Hallberg u. Peck, 1991] zur Berechnung der Lebensdauer unter den Belastungsgrößen Temperatur θ und relative Feuchte RH lautet

$$T = RH^{-\beta_{RH}} \exp \left\{ \frac{E_A}{k_B \theta} \right\}.$$

Dies ist ebenfalls ein modifiziertes Eyring-Modell. Die zu bestimmenden Parameter sind der Exponent β_{RH} sowie die Aktivierungsenergie E_A .

Elektromigrationsmodell

Elektromigration bezeichnet einen Ausfallmechanismus in Halbleitermaterialien. Hierbei wandern Ionen in sehr dünnen Leiterbahnen, bedingt durch hohe Temperaturen und Stromdichten in Richtung der Anode. Dieser Materialtransport kann zu einem Verlust der Leitfähigkeit führen. Das Elektromigrationsmodell der Form

$$T = a J^{-\beta_J} \exp \left\{ \frac{E_A}{k_B \theta} \right\}$$

versucht den Einfluss der Stromdichte J und der Temperatur θ auf die Lebensdauer zu beschreiben. Da dieses Modell ähnlich wie (3.18), (3.19) und (3.20) eine modifizierte Form von (3.17) darstellt, entsprechen die Größen a , E_A und k_B denen des Eyring-Modells. Der Exponent β_J liegt üblicherweise bei 2.

Drei-Größen-Modell

Das folgende Modell dient der Berücksichtigung der relativen Feuchte RH , der Temperatur θ und der elektrischen Spannung U als Belastungsgrößen. Es handelt sich hierbei um ein modifiziertes Eyring-Modell in der Form

$$T = a \exp \left\{ \frac{E_A}{k_B \theta} \right\} U^{-\beta_U} RH^{-\beta_{RH}}.$$

Es ist ebenfalls möglich, das Modell mit exponentiellen Termen für die Spannung und die relative Feuchte anzugeben. Das Modell besitzt vier unbekannte zu bestimmende Parameter: a , E_A , β_U und β_{RH} , drei weniger als das allgemeine Eyring-Modell.

Simoni-Modell

In [Simoni u. a., 1993] und [Simoni, 1999] wird ein Modell zur Bestimmung der Lebensdauer bei unterschiedlichen Belastungsarten von Isolierstoffen vorgestellt. Das Modell berücksichtigt den Fall eines unteren Grenzwertes einer Belastungsart und Belastungen, die auf jedem Level die Lebensdauer beeinflussen. Die Lebensdauer T ergibt sich nach

$$T = \frac{T_{E\theta} \exp(-m_E E' - m_\theta \theta + c_{m_E, \theta} E' \theta)}{\left[\frac{E'}{E'_{\theta 0}} + \frac{\theta}{\theta_{E0}} - k_c \left(\frac{E'}{E'_{\theta 0}} \right) \left(\frac{\theta}{\theta_{E0}} \right) - 1 \right]^{\beta_S}},$$

mit $T_{E\theta}$ als Lebensdauer bei Raumtemperatur ohne elektrische Belastungen. Die Größe $T_{E\theta}$ wird über $T_{E\theta} = \exp(a_1 - b_1 E) + \exp(a_2 + b_2 \theta)$ bestimmt, wobei die Anpassungsparameter a_i und b_i den experimentellen Ergebnissen anzupassen sind.

Die elektrische Belastung ist mit $E' = E - E_D$ berücksichtigt. Sie wird als Differenz aus dem elektrischem Gradienten E und dem Grenzwert E_D , unterhalb dessen die elektrische Belastung vernachlässigt werden kann, dargestellt. Die thermische Belastung wird mit θ beschrieben. Die Größe $E'_{\theta 0}$ beschreibt den Grenzwert der elektrischen Belastung bei $\theta = 0$, die Größe θ_{E0} kennzeichnet den thermischen Grenzwert für $E' = 0$. Die Größen m_E , m_θ , $c_{m_E, \theta}$ und k_c bezeichnen Modellparameter, mit m_θ als Steigung der Kennlinie der thermischen Lebensdauer kennlinie, m_E als Steigung der Kennlinie der elektrischen Lebensdauer kennlinie, $c_{m_E, \theta}$ als Koeffizient, der eine Verringerung von m_E bei hohen Temperaturen berücksichtigt und k_c zur Anpassung der Höhe des Grenzwertes an experimentelle Ergebnisse.

Der Nenner-Exponent β_S dient dazu, die unterschiedlichen, materialbedingten Übergänge der Lebensdauer kennlinien hin zu einem horizontalen Verlauf zu berücksichtigen. Der Exponent β_S lässt sich als eine Funktion von E und θ gemäß

$$\beta_S = \beta_{S,0} \left(\left| \frac{E - E_{\theta 0}}{E_{\theta 0}} \right|^l + \left| \frac{\theta - \theta_{E0}}{\theta_{E0}} \right|^l \right)$$

darstellen, wobei l als Anpassungsparameter entsprechend zu wählen ist.

Coffin-Manson-Modell

Das Coffin-Manson-Modell beschreibt den Einfluss von Temperaturzyklen auf das Risswachstum in Metallen. Die Nutzungsdauer N wird in Form von Temperaturzyklen nach der Gleichung

$$N = a\nu_{\theta}^{-\alpha_{\text{CM}}} \Delta\theta^{-\beta_{\text{CM}}} \exp \left\{ \frac{E_{\text{A}}}{k_{\text{B}}\theta_{\text{max}}} \right\}$$

berechnet, wobei ν_{θ} die Frequenz der Temperaturzyklen kennzeichnet, $\Delta\theta$ die Temperaturdifferenz in einem Zyklus und θ_{max} die maximale Temperatur in jedem Zyklus darstellt. Die Parameter α_{CM} und β_{CM} sind konstante Größen, die für jeden Werkstoff experimentell bestimmt werden müssen. Die Werte liegen üblicherweise in der Größenordnung von -0.33 bis 2 .

Taylor-Gerade

Die Standzeit von spanenden Werkzeugen als Analogon zur Nutzungsdauer wird in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit v_{c} nach der Gleichung

$$T = v_{\text{c}}^{\alpha_{\text{vc}}} c_{\text{v}}$$

berechnet. Die Gleichung beschreibt in der logarithmierten Version die Taylor-Gerade [Taylor, 1907], wobei die Größen α_{vc} und c_{v} empirisch zu bestimmen sind.

Wöhlerlinie

Die Wöhlerlinien [Wöhler, 1863] stellen den Zusammenhang zwischen einer konstant schwingenden mechanischen Beanspruchung B und der Nutzungsdauer N eines Bauteils her. Die zugehörigen Einstufenversuche werden Wöhlerversuche oder Ermüdungsversuche (nach dem Ausfallkriterium der Materialermüdung) genannt. Bei einer Wöhlerlinie bzw. Wöhlerkurve wird die Nennspannungsamplitude einer schwingenden Beanspruchung über der Schwingspielzahl als Lebensdauer aufgetragen (siehe Abbildung 3.6). Es sind ebenfalls andere Parameter denkbar. Wichtig bei den Versuchen zur Erzeugung einer Wöhlerlinie ist, dass die Beanspruchungen ein konstantes Spannungsverhältnis $R = B_{\text{min}}/B_{\text{max}}$ als Quotient zwischen unterer Beanspruchung B_{min} und oberer Beanspruchung B_{max} aufweisen. Bei einer ansteigenden Änderung der Beanspruchungsniveaus der Form $B_i > B_j$ mit $i > j$ werden die Bereiche der Dauerfestigkeit, der Zeitfestigkeit sowie der Kurzzeitfestigkeit durchlaufen. Bei der Berechnung der Lebensdauer eines Bauteils unter schwingenden mechanischen Beanspruchungen nimmt der Bereich der Zeitfestigkeit eine besondere Rolle ein, da er den Bereich definiert, in dem eine begrenzte Nutzung des Systems möglich ist. Der Bereich der Zeitfestigkeit kann mit verschiedenen Formeln mathematisch approximiert werden [Haibach, 2002]. Üblicherweise wird die Approximation

$$N_i = N_{\text{D}} \left(\frac{B_i}{B_{\text{D}}} \right)^m = K B_i^m \quad (3.21)$$

mit

$$K = \frac{N_D}{B_D^m}$$

benutzt. Die Nutzungsdauer N_D kennzeichnet den Bereich des Übergangs von der Zeitfestigkeit in die Dauerfestigkeit. Die zugehörige Beanspruchung wird Dauerbeanspruchbarkeit B_D genannt. Die Steigung der Kurve wird durch m ausgedrückt.

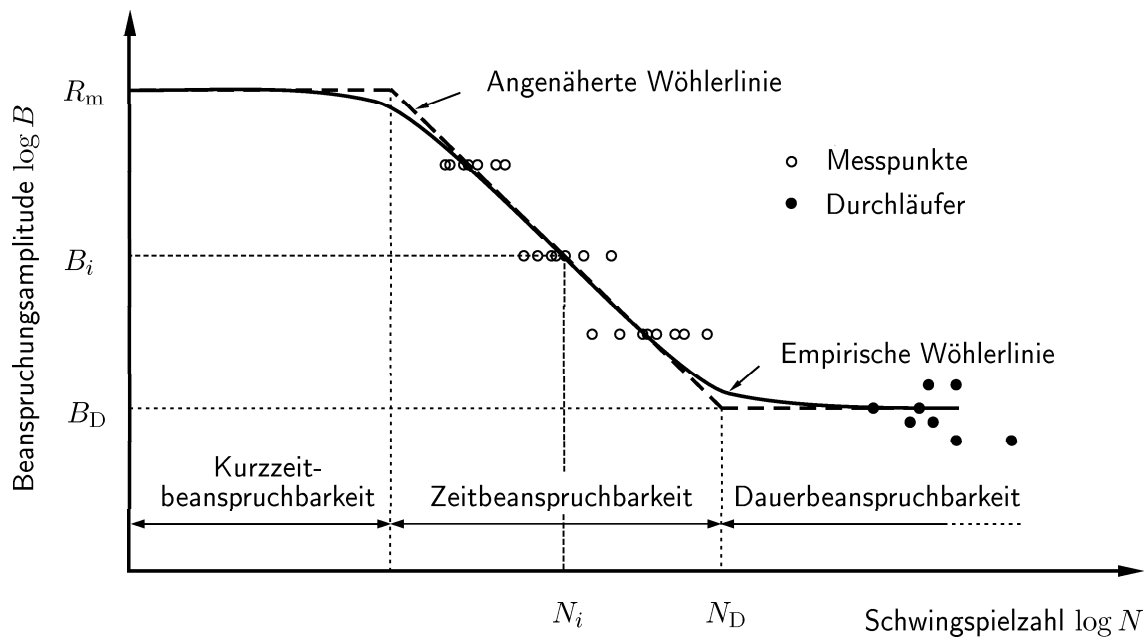


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Wöhlerlinie

Wenn ein Dauerfestigkeitsbereich existiert, kann ein Bauteil theoretisch beliebig lange mechanischen Schwingungen ausgesetzt werden, solange $B_i \leq B_D$ gilt. Belastungen oberhalb der Dauerbeanspruchbarkeit verursachen ein Versagen nach einer bestimmten Zahl von Schwingspielen. Die Beanspruchungshöhe, die innerhalb eines halben Schwingspiels zum Versagen führt, entspricht der Zugfestigkeit R_m des Bauteils.

Gaßnerlinie

Die Beschreibung der Lebensdauer unter variablen mechanischen Beanspruchungen wird durch den Ansatz von [Gaßner, 1939] beschrieben. Zur Ermittlung dieser Kennlinien wird eine möglichst genaue Kenntnis der Verteilung der auftretenden Beanspruchungsniveaus benötigt. Die Gaßnerlinien werden wie folgt ermittelt:

- Die Beanspruchungen müssen bezüglich ihres Teilfolgeumfangs, ihrer Häufigkeitsverteilung sowie ihrer Mittel- und Extremwerte bekannt sein.
- Die Versuche werden auf unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus durchgeführt. Ein höheres Beanspruchungsniveau führt zu einer linearen Vergrößerung aller Beanspruchungen der Teilfolge, ein kleineres Beanspruchungsniveau

zu einer linearen Verkleinerung. Der Teilfolgeumfang und die Verteilungsform bleiben konstant.

- Die Anzahl der Wiederholungen einer Teilfolge hängt von dem jeweiligen Beanspruchungsniveau ab. Bei niedrigen Beanspruchungsniveaus ist die Wiederholungsrate größer als bei höheren Beanspruchungsniveaus. Eine Teilfolge muss auf allen Beanspruchungsniveaus mindestens 5- bis 10-mal wiederholt werden können, bis es zum Erreichen des gewählten Versagenskriteriums kommt.
- Die jeweils ermittelten Nutzungsdauerwerte N_i werden über dem Maximalwert B_{\max_i} (deutschsprachiger Raum)

$$N_i = K B_{\max_i}^m$$

oder dem Effektivwert B_{eff_i} (angelsächsischer Raum)

$$N_i = K B_{\text{eff}_i}^m$$

der jeweiligen Teilfolge aufgetragen.

Die Nutzungsdauerwerte der Gaßnerlinien liegen deutlich über den Ergebnissen der Wöhlerlinien, wie schematisch in Abbildung 3.7 gezeigt wird. Dies liegt an dem Anteil geringerer Beanspruchungsniveaus innerhalb der Teilfolgen der Betriebsfestigkeitsversuche. Diese führen zu einer geringeren Schädigung und somit zu einer höheren Lebensdauer.

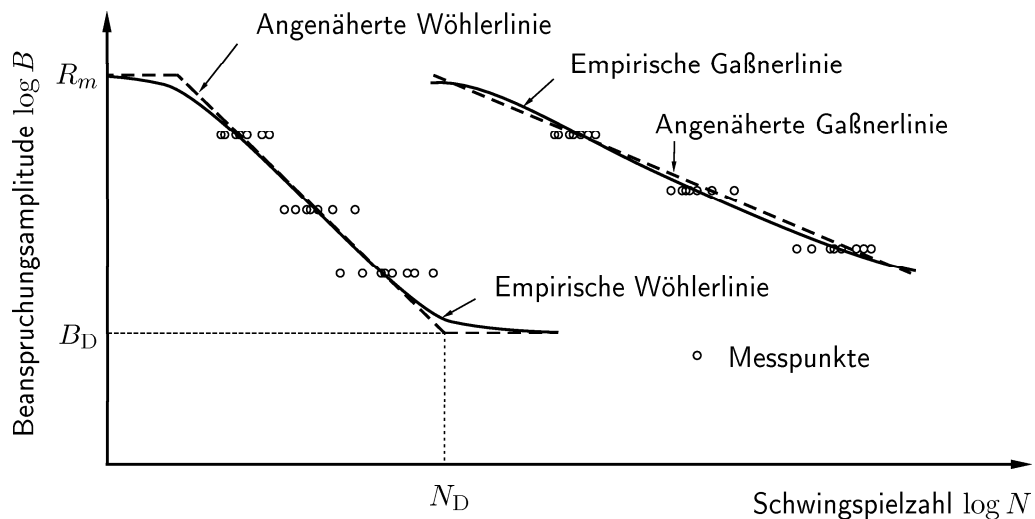


Abbildung 3.7: Schematischer Vergleich zwischen Wöhlerlinie und Gaßnerlinie

3.2.3 Schadensakkumulationshypothesen

Da die Beanspruchungen einer technischen Komponente in der Realität selten zeitlich konstante Größen sind und ihr zeitliches Auftreten (Beanspruchungs-Zeit-Funktion) nicht immer bekannt ist, wurden verschiedene Verfahren entwickelt, um die

Lebensdauer bzw. den Verbrauch des Lebensdauerpotenzials (Nutzungsvorrat nach [DIN 31051, 2003]) bei variierenden Beanspruchungsniveaus unter Zuhilfenahme von Lebensdauermodellen zu bestimmen. Bei der Lebensdauerberechnung mechanisch belasteter technischer Systeme ist die Definition einer charakteristischen Kenngröße, die als Schädigung D bezeichnet wird, von großer Bedeutung. Diese Schädigung ist abhängig von

- der Beanspruchungshöhe B_i ,
- der Zahl n_i der Beanspruchungen mit konstantem Beanspruchungsniveau B_i ,
- der Frequenz ν des Auftretens der Beanspruchungen im Bauteil,
- der Umgebungstemperatur θ ,
- der Feuchtigkeit RH und
- weiteren Faktoren X .

Unter der Annahme einer konstanten Frequenz ν und konstanter Umgebungsbedingungen θ , RH und X lässt sich die Schädigung D vereinfacht wie folgt darstellen:

$$D = g(B, n, \nu, \theta, RH, \dots) = g(B, n). \quad (3.22)$$

Für die Schädigung gilt $D = 0$ für ungeschädigte Bauteile. Der Wert der Schädigung D steigt mit zunehmender Nutzungsdauer in Abhängigkeit der Beanspruchungs-Zeit-Funktion an. Beim Erreichen eines kritischen Wertes $D \geq D^*$ kommt es zum Versagen des Bauteils. Üblicherweise wird $D^* = 1$ gewählt. Die mathematische Formulierung der Kenngröße *Schädigung* und ihre beanspruchungsbedingte Änderung wird als Schadensakkumulation oder präzise Schadensakkumulationshypothese bezeichnet.

Schadensakkumulationshypothesen können wie folgt klassifiziert werden:

1. Zu betrachtendes Ausfallkriterium (siehe Abschnitt 3.2.1)
 - Rissentstehung,
 - Risslänge,
 - Bruch,
 - Steifigkeitsverlust,
 - Fressen,
 - Restfestigkeit,
 - Delamination
 - ...
2. Betrachtungsgrundlage [Dahl, 1978]
 - Globale Betrachtung des Bauteils mit einer Beanspruchungsgröße
 - Betrachtung der ausfallkritischen Bereiche mit Transformation der Beanspruchung in diese Bereiche

- Einbeziehung von mechanischen und physikalisch-werkstofflichen Einflussgrößen
- 3. Art der Schadensrechnung [Dahl, 1978]
 - Inkrementweise Schadensrechnung
 - Abschnittsweise Schadensrechnung (Zusammenfassung gleichartiger Schädigungsereignisse über einen bestimmten Zeitraum)
 - Extrapolation empirisch ermittelter Trends

Weitere Unterteilungsmöglichkeiten sind die Unterscheidung in

- lineare und nichtlineare Schadensakkumulationshypothesen sowie
- beanspruchungsabhängige und beanspruchungsunabhängige Schadensakkumulationshypothesen.

Deterministische Ansätze

Die Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren und Miner [Palmgren, 1924; Miner, 1945] (im Weiteren Miner-Regel genannt) ist die einfachste, gebräuchteste und umstrittenste Schadensakkumulationshypothese. Die Miner-Regel geht davon aus, dass Beanspruchungen unterhalb der Dauerbeanspruchbarkeitsgrenze B_D keinen schädigenden Effekt haben und daher vernachlässigt werden können. Dies ist gleichbedeutend mit der Annahme einer Steigung der Lebensdauerkurve von $m_D = 0$ für den Bereich der Dauerbeanspruchbarkeit. Es gilt als gesichertes Erkenntnis, dass Beanspruchungen unterhalb der Dauerbeanspruchbarkeitsgrenze ebenfalls zur Schädigung beitragen. Die Miner-Regel ist nach der Art der Schadensrechnung eine inkrementweise Schadensrechnung. Die Gesamtschädigung oder akkumulierte Schädigung setzt sich als Summe

$$D_j = \sum_{i=1}^j d_i \quad (3.23)$$

der einzelnen Schädigungsinkremente d_i zusammen. Das Schädigungsinkrement

$$d_i = \frac{n_i}{N_i}$$

ergibt sich als Verhältnis der Zahl der aufgetragenen Beanspruchungen n_i zur Zahl der ertragbaren Beanspruchungen N_i bis zum Versagen für ein konstantes Beanspruchungsniveau B_i .

Der Versagensfall tritt ein, sobald die Gesamtschädigung eine kritische, maximale Schädigung $D^* = 1$ erreicht hat und es gilt

$$D_j \geq D^* .$$

In mehreren Untersuchungen [vergleiche Haibach, 2002] konnte gezeigt werden, dass die errechneten Lebensdauerwerte große Abweichungen von den experimentell ermittelten Werten aufwiesen. Die empirisch ermittelte kritische Schädigung D^* streut

beispielsweise zwischen den Werten 0,02 und 10. Dies liegt vor allem an der Vernachlässigung des Einflusses der Reihenfolge von hohen und niedrigen Beanspruchungen im Beanspruchungs-Zeit-Verlauf (Reihenfolgeeffekt) [siehe auch Hwang u. Han, 1986] sowie der Tatsache, dass der tatsächliche Schädigungsfortschritt nicht wie angenommen linear verläuft, sondern ein nichtlinearer Prozess ist, dessen Verlauf direkt von der Höhe der Beanspruchung B abhängt (Beanspruchungsabhängigkeit). Hinzu kommt, dass die Höhe des Schädigungsinkrements d_i von der aktuellen Beanspruchung B_i , der bisherigen Schädigung D_{i-1} und dem Verhältnis von B_i zu B_j , $j = 1, \dots, i-1$ abhängt (Beanspruchungswechselwirkung) [Kutt u. Bieniek, 1988].

Um die Genauigkeit der Schadensakkumulation nach der Miner-Regel zu verbessern, wurden verschiedene Modifikationen vorgeschlagen. Neben der Änderung des Wertes für die maximale Schädigung D^* von 1 auf 0,3 [Jacoby, 1969] wurden eine getrennte Anwendung auf unterschiedliche, aufeinanderfolgende Phasen des Schädigungsprozesses sowie Modifizierungen des Lebensdauermodells vorgeschlagen. Letztere Modifikationen berücksichtigen das Wissen darüber, dass Beanspruchungen unterhalb der Dauerbeanspruchbarkeit zur Schädigung beitragen. Hierzu wird je nach Modifikation eine unterschiedliche Steigung m_D der Lebensdauerkennlinie im Dauerbeanspruchbarkeitsbereich angenommen.

Die Modifikationen im Einzelnen:

- Die elementare Miner-Regel extrapoliert die Steigung m des Zeitbeanspruchbarkeitsbereichs in den Dauerbeanspruchbarkeitsbereich ($m_D = m$). Dies entspricht der Annahme einer Dauerbeanspruchbarkeit von $B_D = 0$.
- In der Modifikation nach Haibach [Haibach, 1970] (*Miner modifiziert* genannt) wird eine flachere Steigung von $m_D = 2m - 1$ für den Dauerbeanspruchbarkeitsbereich gewählt.
- Bei der konsequenten Miner-Regel wird davon ausgegangen, dass die Dauerbeanspruchbarkeit kontinuierlich absinkt. Die Lebensdauerkennlinie wird hierzu aus dem Zeitbeanspruchbarkeitsbereich geradlinig verlängert, wobei die Dauerbeanspruchbarkeit mit steigender Schädigung D nach einem empirisch ermittelten Potenzgesetz abnimmt.
- In der Modifikation nach Zenner und Liu [Zenner u. Liu, 1992] wird die Lebensdauerkennlinie im Zeitbeanspruchbarkeitsbereich am Punkt des Kollektivhöchstwertes B_{\max} gedreht, bis zu einer Steigung von $m_D = 0,5(m + m')$. Hierbei ist m' die Steigung der unteren Grenze des Streubereichs der Lebensdauerkennlinien. Diese kann annähernd mit $m' = 3,6$ angenommen werden. Diese neue Bezugslebensdauerkennlinie spiegelt den Effekt wieder, dass die Lebensdauerlinie für die Phase des Schädigungsfortschritts eine steilere Neigung aufweist [Hück u. a., 1990]. Zusätzlich wird bei der Modifikation nach Zenner und Liu die Dauerbeanspruchbarkeit B_D^* auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes B_D verringert ($B_D^* = \frac{1}{2} B_D$). Hierdurch wird dem Phänomen der verringerten Dauerbeanspruchbarkeit bei steigender Schädigung Rechnung getragen.

- Die relative Miner-Regel [Schütz, 1972] besagt, dass der theoretische Wert der kritischen Schädigung $D^* = 1$ durch den die Realität besser beschreibenden Wert D_{real}^* ersetzt wird. Die Problematik dieses Ansatzes besteht in der Festlegung des Wertes für D_{real}^* . Kann eine eindeutige Lebensdauer N_{exp} für den gewünschten Beanspruchungsfall experimentell ermittelt werden, lässt sich D_{real}^* aus $D_{\text{real}}^* = N_{\text{exp}}/N_{\text{rech}}$ berechnen. Der Nenner N_{rech} entspricht der rechnerischen Bezugslebensdauer.

Die Wirkung einiger der genannten Modifikationen auf den Verlauf der Lebensdauererkennlinie sind in Abbildung 3.8 dargestellt.

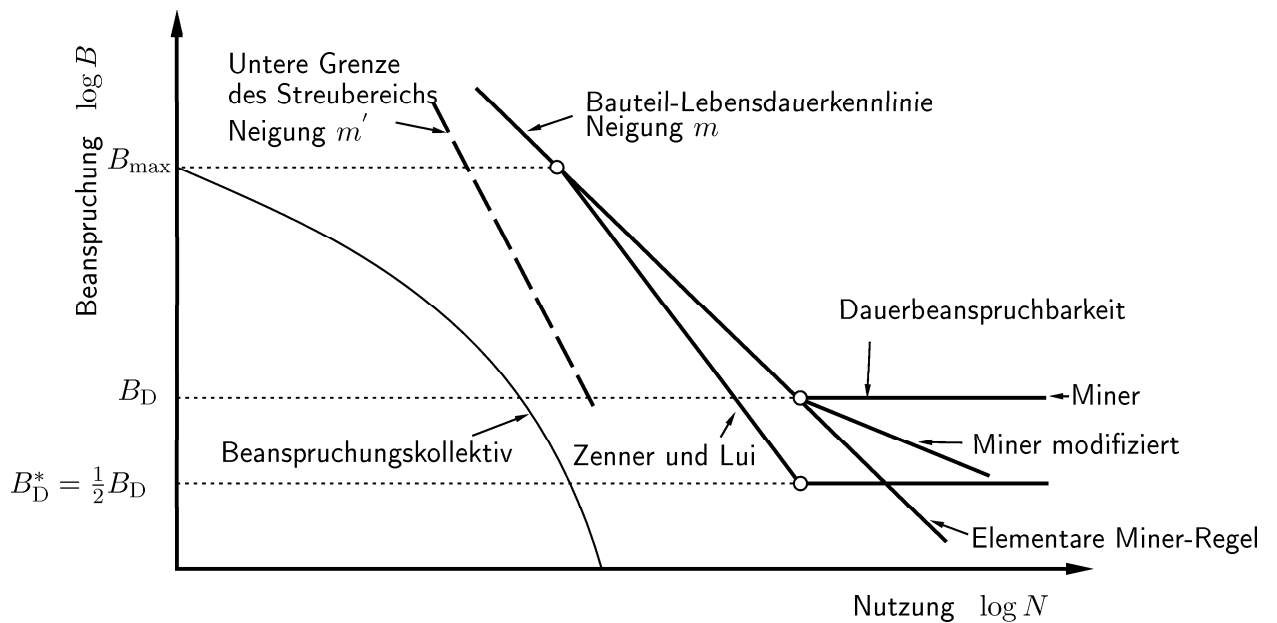


Abbildung 3.8: Miner-Modifikationen

Die Abhängigkeit der Treffergenauigkeit der verschiedenen Modifikationen wurde in [Eulitz u. Kotte, 1997] untersucht. Es zeigte sich, dass das Verfahren nach Zenner und Liu mit einer Streuspannung zwischen 8,6 und 32,0 die geringste Streuspannung für die errechnete Gesamtschädigung D liefert. Es konnte weiterhin festgestellt werden, dass die kritische Schädigung D^* aller bisher beschriebenen Schadensakkumulationshypothesen kein konstanter Wert ist. Die mittlere kritische Schädigung \bar{D}^* schwankt nach den Untersuchungen von [Eulitz u. Kotte, 1997] zwischen den Werten 0,13 und 1,25. Der Wert von D^* ist von vielen Parametern, wie dem Werkstoff, der Belastungsart (Zug, Druck, Biegung, Torsion, ...), der durch das jeweilige Zählverfahren ermittelten Kollektivform sowie der Art der Lebensdauererkennlinie abhängig (synthetisch oder experimentell) [Kotte u. Eulitz, 1995]. Probleme treten bei allen Formen der Miner-Regel für Lebensdauern im Bereich der Dauerbeanspruchbarkeit auf.

Es wurden immer wieder Versuche unternommen, die Ergebnisse der Schadensberechnung nach der Miner-Regel zu optimieren. Um die von der Miner-Regel nicht berücksichtigten Faktoren (Nichtlinearität, Beanspruchungsabhängigkeit und Bean-

spruchungswechselwirkung) in die Schadensakkumulation einzubeziehen, wurden neben den erwähnten Modifikationen verschiedene weitere Varianten, inklusive komplett neuer Ansätze, entwickelt. Sie konnten sich aufgrund verschiedener Aspekte, auf die am Ende dieses Abschnitts eingegangen wird, nicht durchsetzen. Einige wichtige Schadensakkumulationshypothesen werden in [Hwang u. Han, 1986] vorgestellt und verglichen. Im Folgenden werden die Schädigungsinkremente d_i nach verschiedenen Schadensakkumulationshypothesen kurz vorgestellt:

- Die nichtlineare Modifikation der Palmgren-Miner-Regel mit

$$d_i = \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^c$$

und einem progressiven Verlauf der Schadensakkumulation, wobei c eine beanspruchungsunabhängige Konstante mit $c > 1$ darstellt.

- Die Theorie von Henry [Henry, 1955], nach der sich die Dauerbeanspruchbarkeit B_D und die zugehörige Lebensdauer N_D mit steigender Schädigung ändert. Das Schädigungsinkrement ist definiert als

$$d_i = \frac{\frac{n_i}{N_i}}{1 + \frac{1 - \frac{n_i}{N_i}}{\frac{B_i - B_{D0}}{B_{D0}}}},$$

wobei mit B_{D0} die Dauerbeanspruchbarkeit des ungeschädigten Bauteils bezeichnet wird.

- Im Shanley-Modell wird das Schädigungsinkrement zu

$$d_i = a B_i^{c_{SH} m} n_i$$

berechnet. Die Größen a und c_{SH} sind Konstanten, wobei $a > 1$ gilt.

- Das Marco-Starkey-Modell [Marco u. Starkey, 1954] mit

$$d_i = \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^{c_i}$$

ähnelt stark dem Modell der modifizierten Palmgren-Miner-Regel. Der Exponent c_i stellt hierbei eine Funktion der aktuellen Beanspruchung B_i dar.

- Bei der Cortan-Dolan-Theorie [Corten u. Dolan, 1956] wird das Schädigungsinkrement definiert durch

$$d_i = \frac{1}{N_1} n_i \frac{B_i^{c_{CD}}}{B_1} . \quad (3.24)$$

Der Parameter c_{CD} muss hierbei experimentell ermittelt werden und ist sowohl vom Material als auch von der Art des Prüflings abhängig.

- Gatts berücksichtigt in seinem Ansatz [Gatts, 1961]

$$d_i = \left(\frac{B_i}{\frac{n_i}{N_i(1-a_G)} + \frac{1-\frac{n_i}{N_i}}{B_i-B_{D_0}}} \right)^{c_G}$$

die Dauerbeanspruchbarkeit in Form der ursprünglichen Dauerbeanspruchbarkeit vor der ersten Nutzung B_{D_0} . Zusätzlich werden zwei Konstanten a_G und c_G benötigt.

- Die Marin-Theorie [Marin, 1962] mit

$$d_i = \frac{n_i}{N_1} \frac{B_i^{c_{CD}}}{B_1^{c_M}}$$

gleichet dem Ansatz von Cortan-Dolan, wobei sich der Exponent als Differenz aus dem Exponent c_{CD} aus Gleichung (3.24) und dem Exponent c_M zur Beschreibung der Wöhlerlinie in der Form $B_i^{c_M} N_i = K$ ergibt. Diese Gleichung kann aus Gleichung (3.21) hergeleitet werden und es gilt $c_M = 1/m$.

- Der Ansatz von Manson [Manson u. a., 1967] beschreibt eine doppelt lineare Schadensakkumulation mit dem Schädigungsinkrement

$$d_i = \frac{n_i}{N_i^*}.$$

Die Teilschädigung D teilt sich hierbei in einen Anteil D_E während der Rissentstehung und einen Anteil D_A während der Rissausbreitung auf. Der Nenner N_i^* ist abhängig von dem jeweiligen aktuellen Stadium der Rissbildung und von der Gesamtlebensdauer des Bauteils.

- Owen und Howe [Owen u. Howe, 1971] haben nach Untersuchungen an Proben aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) ein Schädigungsinkrement der Art

$$d_i = a_{OH} \frac{n_i}{N_i} - b_{OH} \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^2$$

entwickelt. Die Konstanten a_{OH} und b_{OH} müssen über Restfestigkeitsversuche ermittelt werden.

- In dem Vorschlag von Subramanyan [Subramanyan, 1976; Srivatsavan u. Subramanyan, 1978] wird eine Teilschädigung von

$$d_i = \frac{B_i - B_{D_{i-1}} \left[\left(\frac{B_{i-1}}{B_{D_{i-1}}} \right)^{-\frac{n_{i-1}}{N_{i-1}} c_{Re}} \right]}{\log N_D - \log n_i}$$

vorgestellt. Der Parameter c_{Re} beschreibt eine Konstante, die von der Streckgrenze des Werkstoffs abhängt. Der Ansatz beruht auf der Konstruktion von Isoschadenslinien im Wöhlerdiagramm. Die Wöhlerlinie selbst stellt die Iso-schadenslinie für die kritische Schädigung dar.

- Lemaitre und Plumtree [Lemaitre u. Plumtree, 1979] untersuchten die Schadensakkumulation für Kriechen und Ermüdung inklusive der Interaktion beider Prozesse und kamen zu einem Schädigungsinkrement der Art

$$d_i = 1 - \left[(1 - D_{i-1}) \right]^{1/c_{LP}} - \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^{c_{LP}} - D_{i-1}.$$

Der Exponent c_{LP} beschreibt eine Materialkonstante und hängt davon ab, ob die Versuche spannungs- oder dehnungskontrolliert durchgeführt wurden.

- [Gnilke, 1980] schlägt ein Verfahren vor, bei dem das Absinken der Dauerbeanspruchbarkeit B_D nicht wie im Verfahren *Miner modifiziert* willkürlich erfolgt, sondern aus einem Ansatz linear-elastischer bruchmechanischer Überlegungen heraus. Die aktuelle Dauerbeanspruchbarkeit B_{D_i} lässt sich aus der ursprünglichen Dauerbeanspruchbarkeit B_{D_0} nach der Gleichung $B_{D_i} = (B_{\max}/B_G) B_{D_0}$ abschätzen. Die Größen B_{\max} und B_G beschreiben die maximale aufgetretene Beanspruchung sowie die maximal mögliche Beanspruchung (Beanspruchbarkeit) (z.B. die Zugfestigkeit R_m bei mechanisch belasteten Bauteilen). Die mittlere Nutzungsdauer wird aus

$$\bar{N} = \frac{N_{D_0} B_{D_0}^m}{B_{D_0}^{m-1} - B_{D_k}^{m-1}} \left[\frac{B_{D_0}^{m-1} - B_l^{m-1}}{\sum_{i=1}^{l-1} \left(\frac{n_i}{n_{ges}} B_i^m \right)} + \sum_{j=1}^k \frac{B_j^{m-1} - B_{j+1}^{m-1}}{\sum_{i=1}^j \left(\frac{n_i}{n_{ges}} B_i^m \right)} \right]$$

berechnet, wobei N_{D_0} die maximale Nutzungsdauer bei einer ursprünglichen Dauerbeanspruchbarkeit von B_{D_0} darstellt. Die Beanspruchung B_{D_k} steht für die Dauerbeanspruchbarkeit nach k Nutzungen. Der Index l in der Summation im ersten Divisor des Klammerterms beschreibt die Zahl der Beanspruchungsniveaus oberhalb von B_{D_0} bzw. in der Form B_l das nächste Beanspruchungsniveau oberhalb von B_{D_0} bei einer Aufteilung des Beanspruchungskollektivs nach fallenden Beanspruchungsniveaus.

- In dem nichtlinearen Modell zur Schadensakkumulation von Fong [Fong, 1982] wird das Schädigungsinkrement definiert als

$$d_i = \frac{\exp \left(c_F \frac{n_i}{N_i} \right) - 1}{\exp(c_F) - 1}.$$

Der Verlauf der Gesamtschädigung hängt direkt von c_F ab. Der Parameter c_F muss den Gegebenheiten entsprechend gewählt werden.

Diese kurze Übersicht gibt einen ersten Überblick über einige Anstrengungen, den Ansatz nach Palmgren-Miner zu optimieren bzw. die in ihm nicht berücksichtigten Faktoren einzubeziehen. In [Hwang u. Han, 1986] werden drei weitere Schadensakkumulationshypothesen vorgestellt, die auf der Bestimmung des *Fatigue Modulus* (Verhältnis von applizierter Spannung zur Dehnung ϵ), auf dem Verhältnis von aktueller Dehnung $\epsilon(i)$ zur Dehnung ϵ_f beim Ausfall sowie Berücksichtigung einer

Initialdehnung ϵ_0 beruhen. Morrow erweiterte die Miner-Regel um einen Faktor, der in Abhängigkeit von der Maximalbeanspruchung den Reihenfolgeeinfluss der Beanspruchungen berücksichtigen soll [Morrow, 1986]. Schott schlägt die Einführung von Folge-Lebensdauer-Kurven vor [Schott, 1997]. Zweistufenversuche geben Information über das Schädigungsverhalten des Bauteils. Diese Informationen werden im Zusammenhang mit einer Lebensdauer kennlinie dazu genutzt, den Reihenfolgeeinfluss abzuschätzen. Dieser kann einen lebensdauer verlängernden oder -verkürzenden Einfluss haben. Zur Einbeziehung des gleichen Aspektes modifizierten Broutman und Sahu [Broutman u. Sahu, 1972] die Miner-Regel unter Berücksichtigung der Verringerung der Zugfestigkeit bei ansteigender Schädigung. Dieser Effekt tritt überwiegend in GFK auf. Ein anderer Ansatz zur Bestimmung der Schädigung wird in [Petryna u. Krätzig, 1999] verfolgt. Hier berechnet sich die Schädigung einer mechanisch beanspruchten Struktur zu

$$D_{\text{Struk}} = \max(D_{\lambda_i}) = \max\left(1 - \frac{\lambda_i(D)}{\lambda_i(D=0)}\right),$$

wobei $\lambda_i(D)$ den i -ten Eigenwert der Steifigkeitsmatrix der Struktur nach einer Schädigung D und $\lambda_i(D=0)$ den i -ten Eigenwert der ungeschädigten Struktur darstellen. Zu jedem Eigenwert existiert somit ein Schädigungsindikator D_{λ_i} . Nimmt einer dieser Schadensindikatoren den Wert $D_{\lambda_i} = 1$ an, versagt die Struktur in der entsprechenden Belastungsrichtung. Der Gesamtschaden der Struktur D_{Struk} ergibt sich als Maximum der Schadensindikatoren der einzelnen Eigenwerte. In [Huang, 2000] wird eine doppelt lineare Schadensakkumulationshypothese mit Änderung der Lebensdauer kennlinie im Dauerbeanspruchbarkeitsbereich in Abhängigkeit von der Vorschädigung des Bauteils im Zeitbeanspruchbarkeitsbereich und dem Werkstoff vorgeschlagen.

Treten wechselnde mechanische Beanspruchungen bei wechselnden Temperaturen auf, muss der Effekt der Temperaturänderungen auf die Zeitbeanspruchbarkeit berücksichtigt werden. Der einfachste Ansatz besteht in der Kombination der Schadensakkumulation nach Robinson-Taira [Robinson, 1952; Taira, 1960] mit der Regel nach Miner (3.23). Der Ansatz von Robinson-Taira ist analog zur Miner-Regel aufgebaut und berechnet die Teilschädigung aus dem Verhältnis der Dauer der Nutzung bei einer aktuellen Temperatur zur maximal möglichen Lebensdauer unter dieser Temperatur.

Esztergar [Esztergar, 1972] modifizierte den Ansatz von Robinson-Taira zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Temperatur und mechanisch bedingten Schädigungen. Sein Vorschlag benötigt vier experimentell zu bestimmende Parameter.

In [Degrieck u. Paepegem, 2001] werden weitere Schadensakkumulationshypothesen, speziell für faserverstärkte Kunststoffe vorgestellt. Neben Ansätzen zur Bestimmung der aktuellen Schädigung auf der Basis von Steifigkeitsänderungen werden Ansätze, basierend auf zerstörenden Restfestigkeitsversuchen vorgestellt.

Es zeigt sich, dass alle vorgestellten Ansätze zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit der Miner-Regel einen oder mehrere der folgenden Nachteile aufweisen,

welche weiterhin zum Einsatz der klassischen Miner-Regel im Großteil der Lebensdauerberechnungen führen. Die neuen Ansätze

- benötigen zusätzliche Informationen, die mit gesonderten Testreihen ermittelt werden müssen. Diese sind mit einem erhöhten zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden.
- wurden zum Teil bisher nur an bestimmten Werkstoffen und bei bestimmten Lastprofilen validiert. Ihre Übertragbarkeit auf andere Bedingungen ist daher fraglich und damit ebenso ihr Vorteil gegenüber der klassischen Miner-Regel.
- benötigen teilweise einen wesentlich höheren Rechenaufwand.

Stochastische Ansätze

Der gemeinsame Nachteil aller Verfahren der deterministischen Schadensakkumulationshypothesen ist, dass sie die stochastischen Einflussgrößen nicht berücksichtigen. Dies sind vor allem Abweichungen in den Materialeigenschaften der Proben, die sich in den Kennlinien der Lebensdauerkurven widerspiegeln. Diese Streuungen beruhen hauptsächlich auf natürlichen Abweichungen des Materials sowie auf Schwankungen im Herstellungs- und Verarbeitungsprozess. Das Vorhandensein dieser Streuungen in den Testreihen hat zu der Annahme geführt, dass der Ermüdungsprozess ein stochastischer Prozess ist. Aus dieser Erkenntnis entstanden verschiedene stochastische Ansätze zur Schadensakkumulation. Nach [Kutt u. Bieniek, 1988] lassen sich diese Ansätze in drei Gruppen unterteilen.

1. Ansätze zur Beschreibung der Verteilungsdichtefunktion der maximalen Nutzungsdauer bei Einstufenversuchen. Eine Übersicht hierüber ist in [Freudenthal u. Gumbel, 1956] gegeben.
2. Ansätze unter Berücksichtigung der Beanspruchung als Zufallsgröße. Die Methoden der Schadensakkumulation bleiben hierbei deterministisch und einfach.
3. Ansätze, bei denen die Schadensakkumulation als Zufallsprozess berücksichtigt wird.

Bei den stochastischen Ansätzen der Schadensakkumulation in dieser Arbeit erfolgt eine Beschränkung auf den dritten Typ. Im Folgenden werden einige Ansätze zur stochastischen Schadensakkumulation vorgestellt.

- Erste Ansätze in dieser Richtung erfolgten 1959 von Parzan. In seiner Arbeit [Parzan, 1959] wird die Schadensakkumulation mit Hilfe der Erneuerungstheorie beschrieben. Der Erwartungswert und die Varianz der akkumulierten Schädigung \mathbf{D} werden aus den Momenten der Ausfallzeit sowie der Belastungszyklen bestimmt und die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall $\Pr\{\mathbf{D} \geq 1\}$ kann geschätzt werden.

- Crandell und Mark stellen einen Ansatz zur Bestimmung des Erwartungswertes $E(\mathbf{D})$ der Schädigung im Zeitraum T vor [Crandell u. Mark, 1963]. Voraussetzung für die Rechnung sind Kenntnisse über die zu erwartende Anzahl an Belastungszyklen im Zeitraum T sowie die Verteilung und Verteilungsdichte der Belastungsspitzen.
- Bogdanoff modelliert die Schadensakkumulation, verursacht durch einen Arbeitszyklus in einem Element, als zustands- und zeitdiskreten Markov-Prozess [Bogdanoff, 1978a,b,c]. Jeder Zustand der Markov-Kette stellt eine bestimmte Nutzungsdauer unter bestimmten Beanspruchungen dar. Die Schädigung \mathbf{D} wird beim Übergang von einem Zustand in den nächsten berechnet. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schädigung \mathbf{D} hängt daher nur von der Zustandsverweildauer und der Schädigung vor Eintritt des aktuellen Zustands ab. Die Nachteile dieses Ansatzes sind die Einteilung und Definition der diskreten schädigenden Zustände sowie die Annahme von konstanten Wahrscheinlichkeiten für das Verweilen in einem Zustand oder den Wechsel zwischen zwei Zuständen. Abweichungen in diesen beiden Aspekten sollten daher zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, womit die Überprüfung des Verfahrens ungeklärt bleibt. Ein Vorteil liegt klar in der Beschreibung der Schädigung in Form von Zuständen, an Stelle von Risslängen oder Ähnlichem.
- Johnson und Doner schlagen eine probabilistische Variante der Gleichung von Miner in der Form

$$n_j = N_j \left[\mathbf{D}^* - \sum_{i=1}^{j-1} \frac{n_i}{N_i} \right]$$

vor [Johnson u. Doner, 1981]. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Bestimmung der Verteilung der verbleibenden Nutzungen n_j unter Beanspruchungsniveau B_j bis zum Ausfall. Die Komponente erfuhr jeweils n_i Nutzungen unter den Beanspruchungsniveaus B_i ($i = 1, \dots, j-1$). Die Zufallsgrößen N_i bzw. N_j repräsentieren die zu dem jeweiligen Beanspruchungsniveau zugehörigen maximalen Nutzungsdauern. Es wird die Annahme getroffen, dass die maximalen Nutzungsdauern stochastisch abhängig und lognormalverteilt sind. Die Zufallsgröße \mathbf{D}^* beschreibt die Schadenssumme beim Ausfall, die kritische Schadenssumme oder kritische Schädigung genannt werden kann.

Sie ist definiert als Zufallsvariable mit folgenden Eigenschaften:

- Die kritische Schädigung ist eine Materialeigenschaft für eine gegebene Art von Belastungs- und Umgebungsbedingungen.
- Die Verteilungsfunktion der kritischen Schädigung ergibt sich angenähert aus einer ausreichenden Zahl an Beobachtungen für \mathbf{D}^* für das gegebene Material sowie die Belastungs- und Umgebungsbedingungen.

Die Verteilung von \mathbf{D}^* wird auf Grund der Ergebnisse verschiedener Untersuchungsreihen als normalverteilt angenommen. Zur Bestimmung der statistischen Eigenschaften von n_j wird die Monte-Carlo Simulation genutzt. Es zeigt

sich, dass \mathbf{n}_j negative Werte annehmen kann, was auf einen Ausfall vor Beginn der j -ten Nutzung hinweist.

- Hashin definiert die Schädigung als verbleibende Zahl der Nutzungen \mathbf{n}_f . Diese Größe lässt sich aus Angaben der Momente der maximalen Nutzungsdauer \mathbf{N} berechnen und stellt ihrerseits eine Zufallsgröße mit Erwartungswert $E(\mathbf{n}_f)$ und Standardabweichung σ_{n_f} dar [Hashin, 1983]. Die zu Grunde liegende Schadensakkumulationshypothese in [Hashin u. Rotem, 1978] basiert wie die Hypothese von Subramanyan [Subramanyan, 1976] auf Isoschadenslinien.
- Kutt und Bienek vergleichen drei Ansätze zur Bestimmung der ersten beiden Momente der Schädigung \mathbf{D} unter der Annahme eines Modells nach Miner (3.23) und bekannten Erwartungswerten E sowie Varianzen V der Verteilungen der maximalen Nutzungsdauer \mathbf{N} sowie der aktuellen Nutzung \mathbf{n} [Kutt u. Bieniek, 1988]. Der erste Ansatz berechnet die Momente zu

$$E(\mathbf{D}) = \sum_j E(\mathbf{n}_j) E\left(\frac{1}{\mathbf{N}_j}\right) \quad \text{und} \quad (3.25)$$

$$V(\mathbf{D}) = E\left\{\left[\sum_j \left(\frac{\mathbf{n}_j}{\mathbf{N}_j}\right)\right]^2\right\} - [E(\mathbf{D})]^2. \quad (3.26)$$

Mit vereinfachenden Annahmen ergibt sich der zweite Ansatz zu

$$E(\mathbf{D}) \cong \sum_j \frac{E(\mathbf{n}_j)}{E(\mathbf{N}_j)} \left(1 + VK(\mathbf{N}_j)^2\right) \quad \text{und} \quad (3.27)$$

$$V(\mathbf{D}) \cong \sum_j \left[\frac{E(\mathbf{n}_j)}{E(\mathbf{N}_j)}\right]^2 \left[VK(\mathbf{N}_j)^2 \left(1 - VK(\mathbf{N}_j)^2\right) \left(1 + VK(\mathbf{n}_j)^2\right) + VK(\mathbf{n}_j)^2 \left(1 + VK(\mathbf{N}_j)^2\right)^2\right]. \quad (3.28)$$

Der dritte Ansatz betrachtet die Schädigung als Erneuerungsprozess. Nach dem asymptotischen Theorem für Erneuerungsprozesse ergeben sich der Erwartungswert und die Varianz in diesem Fall zu

$$E(\mathbf{D}) = \sum_j \frac{E(\mathbf{n}_j)}{E(\mathbf{N}_j)} \quad \text{bzw.} \quad (3.29)$$

$$V(\mathbf{D}) = \sum_j \frac{E(\mathbf{n}_j) V(\mathbf{N}_j)}{E^3(\mathbf{N}_j)} + V\left[\sum_j \frac{\mathbf{n}_j}{E(\mathbf{N}_j)}\right]. \quad (3.30)$$

Je nach gewähltem Ansatz zeigt sich eine unterschiedlich große Abweichung der experimentellen Ausfallwahrscheinlichkeit $\Pr\{\mathbf{D} \geq 1\}$ von der errechneten

Ausfallwahrscheinlichkeit. Das in der selben Veröffentlichung vorgestellte Modell zur Schadensakkumulation konnte die Übereinstimmung klar optimieren. Das Modell berechnet das Schädigungsinkrement nach

$$d_i = \left(1 + c_m \sum_j \left(\frac{B_j - B_i}{B_i} \right) \frac{n_j}{N_j} \right) \left[\left(D_{i-1}^{\frac{1}{c_i}} + \frac{n_i}{N_i} \right)^{c_i} - D_{i-1} \right],$$

wobei $c_i = g(B_i)$ als Funktion der Beanspruchung experimentell bestimmt werden muss. Der erste Term beschreibt den Einfluss der Beanspruchungsänderung auf die Schädigungsrate $\partial D / \partial x$. Die Größe c_m beschreibt hierbei eine Materialkonstante. Dieses Modell berücksichtigt somit den Reihenfolgeeffekt, die Beanspruchungsabhängigkeit und die Beanspruchungswechselwirkungen. Der Erwartungswert der akkumulierten Schädigung \mathbf{D}_i wird aus einer Taylorreihenentwicklung mit den Erwartungswerten für die maximale Nutzungsdauer $E_i(1/\mathbf{N}_i)$ und die Anzahl der Nutzungen $E_i(\mathbf{n}_i)$ unter einer definierten Beanspruchung B_i als Entwicklungspunkte approximiert. Die Berechnung der Varianz erfolgt anschließend nach Gleichung (3.4).

- In [Min u. a., 1995] wird eine stochastische Schadensakkumulation vorgestellt, die auf folgenden Hypothesen basiert:

- Das Schädigungsinkrement einer Nutzung $n_i = 1$ ergibt sich phänomenologisch nach

$$\mathbf{d}_i = \frac{1}{\mathbf{N}_i} \quad (3.31)$$

bzw.

$$\log \mathbf{d}_i = -\log \mathbf{N}_i. \quad (3.32)$$

Das Schädigungsinkrement und die maximale Nutzungsdauern sind Zufallsgrößen, die von der Beanspruchung und den Materialeigenschaften abhängen. Die Verteilung von \mathbf{d}_i ist identisch zur Verteilung von \mathbf{N}_i für entsprechende Beanspruchungsniveaus B_i .

- Die akkumulierte Schädigung ergibt sich unter Nutzung der stochastischen Miner-Regel

$$\mathbf{D}_i = \sum_{i=1}^n \mathbf{d}_i,$$

wobei die Nachteile der Miner-Regel dadurch kompensiert werden, dass die verbesserte Neuber Methode zur Bestimmung der lokalen elastoplastischen Dehnung und Spannung genutzt wird. Hiernach ergibt sich das Schädigungsinkrement zu

$$d_i = g_i(\Delta \epsilon_i, R_i) \big|_{d_{i-1}=g_{i-1}(\Delta \epsilon_{i-1}, R_{i-1})}.$$

Die Funktion $g_i(\cdot)$ stellt eine komplexe Schädigungsfunktion dar, $\Delta\epsilon_i$ repräsentiert die zyklische Dehnungsamplitude und R_i das Spannungsverhältnis. Das Schädigungsinkrement und die zyklische Dehnungsamplitude werden iterativ für jede Beanspruchungsfolge ermittelt.

Für große n gilt der zentrale Grenzwertsatz und es folgt $\mathbf{D}_i \sim N(\mu_{\mathbf{D}_i}, \sigma_{\mathbf{D}_i})$, mit den zentralen statistischen Momenten der akkumulierten Schädigung nach (3.5) als

$$\begin{aligned} \mu_{\mathbf{D}_i} &= \sum_{i=1}^n E(\mathbf{d}_i) \quad \text{und} \\ \sigma_{\mathbf{D}_i} &= \sqrt{\sum_{i=1}^n V(\mathbf{d}_i)}. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Die Größen $E(\mathbf{d}_i)$ und $V(\mathbf{d}_i)$ können mit (3.32) von \mathbf{N}_i abgeleitet werden.

- Für die kritische Schädigung folgt aus mehreren experimentellen Daten

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_i^* &\sim \text{LN}(\mu_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*}, \sigma_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*}) , \\ \mu_{\mathbf{D}_i^*} &\approx 1 \quad \text{und} \\ \text{VK}(\mathbf{D}_i^*) &\approx \text{VK}(\mathbf{N}_i) \end{aligned} \quad (3.34)$$

für metallische Werkstoffe.

Der vorgeschlagene Ansatz eines stochastischen Schadensakkumulationsgesetzes basiert weitestgehend auf einer stochastischen Miner-Regel. Ein Ansatz zur Umgehung der Nachteile der Miner-Regel wird vorgestellt, im Zusammenhang mit den statistischen Eigenschaften der Größen jedoch nicht weitergeführt.

Alle hier vorgestellten Ansätze versuchen, die stochastischen Eigenschaften der Lebensdauermodelle zu berücksichtigen. Die deterministischen Ansätze können als Spezialfall der stochastischen Ansätze gesehen werden, da sie sich nur auf einen bestimmten Bereich aus der Streuspanne der Ergebnisse der Lebensdauermodelle beziehen. Es kann daher die Annahme getroffen werden, dass die Ergebnisse der stochastischen Ansätze den Prozess der Schadensakkumulation genauer beschreiben können als die deterministischen Ansätze. Dies gilt nur unter der Voraussetzung, dass die statistischen Eigenschaften des Lebensdauermodells hinreichend genau bekannt sind.

3.3 Technische Diagnose

Als Kerninformation der Lebensdauerberechnung wird die Information über die aktuelle Belastung/Beanspruchung oder die aktuelle Teilschädigung/Gesamtschädigung der Einheit benötigt. Um diese Größen zu erfassen, können je nach System und betrachteter Größe verschiedene Verfahren der technischen Diagnose angewendet werden.

Das Ziel dieser Verfahren ist es, einen bestimmten Systemzustand im System zeitlich und räumlich zu detektieren sowie seine Ursachen zu ermitteln. Dieser Zustand kann beispielsweise ein Fehlverhalten sein, wie es im Rahmen der Fehlerdiagnose diagnostiziert werden soll, oder die Beanspruchung der Einheit.

Die Unterteilung der technischen Diagnose erfolgt in die Gruppe der Verfahren zur Merkmalsgewinnung, die Gruppe der Verfahren zur Klassifizierung bzw. Zuordnung von Zustandsarten und die Gruppe der Verfahren der Zustandsanalyse. Im Rahmen dieser Arbeit wird primär auf die Verfahren der Merkmalsgewinnung eingegangen, da die weiteren Fragestellungen der Diagnose hier zweitrangig sind. Die Verfahren der Klassifizierung und Zustandsanalyse werden in [Wolters u. Söffker, 2004a] zusammengefasst.

Die Verfahren zur Merkmalsgewinnung unterscheiden sich in

- signalbasierte Verfahren,
- analytisch modellbasierte Verfahren, wie
 - Paritätsraumverfahren,
 - Parameterschätzung und
 - Beobachter sowie
- qualitativ modellbasierte Verfahren.

3.3.1 Signalbasierte Verfahren

Signalbasierte Verfahren der Merkmalsgewinnung kommen immer dann zum Einsatz, wenn die gemessenen Größen direkt Aufschluss über den zu betrachtenden Zustand liefern oder liefern sollen, weil beispielsweise keine anderen (modellgestützten) Verfahren zur Verfügung stehen. Die signalbasierten Verfahren sind die in der Praxis am weitesten verbreiteten Verfahren zur Merkmalsgewinnung in der technischen Diagnose.

Die Gewinnung von Merkmalen erfolgt direkt aus den gemessenen Signalen oder über abgeleitete Signalkenngrößen und Signalfunktionen bei denen unter Umständen ein Teil der Signalinformationen verloren geht. Die Signale werden hierzu entweder als zeitabhängige Größen, als frequenzabhängige Größen oder als Größen im kombinierten Zeit-Frequenzbereich betrachtet.

Im Folgenden wird die Signalanalyse für den Zeitbereich, den Frequenzbereich und den kombinierten Zeit-Frequenzbereich vorgestellt.

Zeitbereich

Die meisten Signale lassen sich auf eine additive oder multiplikative Kombination von idealisierten Elementarsignalen, wie harmonischen Schwingungen, zurückführen, was ihre Auswertung wesentlich vereinfacht. Nachfolgend sind typische Beispiele für Kenngrößen zur Beschreibung harmonischer Schwingungen mit der Periodendauer T_p aufgeführt.

- Der Scheitelwert (Amplitude) $y_{\max/\min}$ sowie der Scheitel-Scheitelwert $y_{\max} - y_{\min}$ der Schwingung erfasst die Maximal- und Minimalwerte sowie die Spanne des Schwingungssignals.
- Der arithmetische Mittelwert $\overline{y(t)}$ wird zur Erfassung der Gleichanteile in dem Schwingungssignal nach

$$\overline{y(t)} = \frac{1}{T_p} \int_{-\frac{1}{2}T_p}^{\frac{1}{2}T_p} y(t) dt$$

bzw. nach Gleichung (3.7) für zeitdiskrete Signale eingesetzt.

- Zur Berücksichtigung größerer Spitzenwerte bei der Mittelwertbildung wird der Effektivwert y_{eff} (auch quadratischer Mittelwert genannt) der periodischen Schwingung nach der Gleichung

$$y_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T_p} \int_{-\frac{1}{2}T_p}^{\frac{1}{2}T_p} y^2(t) dt}$$

eingesetzt. Bei sinusförmigen Schwingung gilt $y_{\text{eff}} = y_{\max}/\sqrt{2}$.

- Um ein Maß für die gegenseitige Abhängigkeit von zwei um eine Zeitdifferenz von Δt versetzte Werte eines Signals $y(t)$ zu erhalten, wird die Autokorrelation

$$R_{yy} = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)y(t + \Delta t) dt,$$

eingesetzt. Die Ähnlichkeit zweier Signalwerte wird mit Hilfe der normierten Autokorrelationsfunktion mit einer Zahl zwischen +1 und -1 bemessen. Der Wert +1 steht hierbei für die größte Übereinstimmung der beiden Signale und der Wert -1 für die größte Unähnlichkeit. Die Autokorrelationsfunktion wird eingesetzt, um periodische Signalanteile von stochastischen Anteilen zu separieren, da einmalige oder kleine, unregelmäßig auftretende Signalanteile vernachlässigt werden. Das Verfahren versagt bei stark gestörten Signalen oder schwachen Ausprägungen der Merkmale.

- Analog zur Autokorrelation wird die Abhängigkeit zweier unterschiedlicher Signale $y_1(t)$ und $y_2(t)$ zueinander mit der Kreuzkorrelation

$$R_{y_1 y_2} = \int_{-\infty}^{\infty} y_1(t)y_2(t + \Delta t) dt.$$

beschrieben.

- Der Scheitelfaktor (Crest-Faktor) C , definiert als Verhältnis des Scheitelwerts y_{\max} zum Effektivwert y_{eff} , dient zur Erfassung impulshaltiger Signaländerungen. Bei einer solchen Signaländerung steigt zunächst der Scheitelwert y_{\max} an, während der Effektivwert y_{eff} mit einiger Verzögerung folgt. Dies führt zur zwischenzeitigen Änderung des Scheitelfaktors C .
- Statistische Kenngrößen wie die Wahrscheinlichkeitsdichte (siehe hierzu Abschnitt 3.1.2) und abgeleitete Größen dienen zur Beschreibung stochastischer Signale $y(t)$. Die Parameter der Verteilung, wie beispielsweise die Varianz (3.4) oder Standardabweichung (3.8), können zur Erkennung bestimmter Merkmalsausprägungen herangezogen werden. Im Rahmen der technischen Diagnose wird ebenfalls der zentrale Momentenkoeffizient dritter Ordnung (Schiefe γ_1) betrachtet. Die Schiefe ist definiert als

$$\gamma_1 = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(x)]^3 f(x) dx \quad \text{bzw.}$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3.$$

Diese Größe stellt ein Maß für eine negative oder positive Abweichung vom Nominal-Mittelwert dar und liefert daher eine Aussage, ob eine Verteilung im Vergleich zu einer Normalverteilung rechts- oder linksschief ist. Für diskrete Effekte wird der vierte zentrale Momentenkoeffizient (Wölbung γ_2 oder Kurtosis) der Verteilungsdichte analysiert:

$$\gamma_2 = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(x)]^4 f(x) dx \quad \text{bzw.}$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4.$$

Ein diskreter Effekt lässt die Wölbung stark ansteigen.

- Korrelationsmuster: Bei der Darstellung von 2D- bzw. 3D-Korrelationsmustern werden zwei bzw. drei verschiedene Signale oder Signalkennwerte eines definierten Zeitfenster gegeneinander aufgetragen. Durch eine geeignete Wahl der Signale entstehen Strukturen von Punktwolken, die sich in Größe und Lage verändern. Eine Quantisierung des Korrelationsmusterraumes kann die Information bei geeigneten Intervallgrößen hervorheben.
- Hüllkurvenverfahren: Durch Bildung einer Einhüllenden des Signalzeitverlaufs können niederfrequente Merkmalsausprägungen mit geringer Amplitude im aufgenommenen Schwingungsgemisch detektiert werden. Dieses Verfahren ist im Zeit- und im Frequenzbereich anwendbar. Hüllkurven werden vor allem dann eingesetzt, wenn es darum geht, die erzeugenden Impulsfolgen von den

höherfrequenten Bauteilresonanzen zu trennen. Für eine weitere Diagnose wird die Hüllkurve bezüglich ihres Mittelwertes, ihrer Schiefe sowie ihrer Wölbung ausgewertet. Verfahren zur Bildung von Hüllkurven sind die Gleichrichtung mit Tiefpassfilter sowie die Hilberttransformation [Geropp, 1995].

Frequenzbereich

Zur Umwandlung von abgetasteten Zeitsignalen in den Frequenzbereich wird das Verfahren der diskreten Fourier-Transformation angewendet.

Mit Hilfe des Frequenzspektrums eines Signals können Impulsfolgen erkannt werden. Neben dem Breitbandspektrum, dass den Frequenzbereich von $\nu = 0$ Hz bis zur vom Abtastsystem bestimmten Grenzfrequenz ν_g darstellt, kann für einen eingeschränkten Frequenzbereich eine erhöhte Frequenzauflösung erfolgen (Frequenzlupenverfahren). Zur Erfassung von schnellen zeitlichen Änderungen dient die Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT), bei der eine Gruppe von Fourier-Transformierten aus sich überlappenden Signalabschnitten gebildet wird. Hierzu wird ein gleitendes Zeitfenster genutzt.

Bei der Frequenzanalyse werden die Amplituden bewertet. Die Amplitude einer bestimmten Schwingung kann nur bei geringem Rauschen oder stark ausgeprägten Schwingungen erkannt werden.

Bei Prozessen mit sehr großen Perioden oder anderen Bedingungen, die zu einer begrenzten Datenmenge führen, kann der unbekannte Signalverlauf aus den gemessenen Werten ermittelt werden. Hierzu wird ein Signalmodell der Form

$$S(j\varpi) = c^2 \left| \frac{1 + b_1 e^{-j\varpi t} + b_2 e^{-2j\varpi t} + \dots + b_q e^{-qj\varpi t}}{1 + a_1 e^{-j\varpi t} + a_2 e^{-2j\varpi t} + \dots + a_p e^{-pj\varpi t}} \right|^2$$

genutzt. Hierbei ist ϖ die Kreisfrequenz $2\pi\nu$, c eine Konstante und a_i sowie b_i sind die zu schätzenden Parameter. In Abhängigkeit des Vorhandenseins der Parameter a_i und b_i wird unterschieden:

- AR-Modelle (*AutoRegressive*), bei denen nur die Parameter a_i vorhanden sind.
- ARMA-Modelle (*AutoRegressive - Moving Average*), wenn die Parameter a_i und b_i vorhanden sind.

Die AR-Modelle eignen sich eher zur Approximation periodischer Signale, während ARMA-Modelle für nicht periodische Signale geeignet sind.

Zur Schätzung der Parameter der Modellgleichung können verschiedene Verfahren wie beispielsweise die Bayes-Methode, die Maximum-Likelihoodmethode, die Methode der gewichteten kleinsten Quadrate etc. angewendet werden [siehe Natke, 1998]. Ein Vorteil der Modelle mit Parametern ist, dass ein eventueller Systemzustand direkt an einer Änderung der Parameter detektiert werden kann.

Die Cepstrumanalyse, definiert als inverse Fourier-Transformation eines logarithmischen Spektrums, ermöglicht die Prüfung eines Signalspektrums bezüglich seiner Periodizität [siehe Kolerus, 2000]. Somit können Harmonische von Schwingungen oder anderweitig multiplikativ verknüpften Frequenzen erkannt werden, da sie

durch die Logarithmierung in eine Summe überführt werden. Die Cepstrumanalyse ermöglicht die Reduktion eines Frequenzspektrums auf die *wesentlichen* Informationen: Seitenbandabstände und Abstände der Harmonischen. Probleme treten auf bei Nullstellen im Spektrum sowie bei der Interpretation großer Rauschanteile des Spektrums im Cepstrum.

Kombinierter Zeit-Frequenzbereich

Zur Analyse von rasch wechselnden Schwingungssignalen ohne periodischen Charakter eignen sich die Verfahren der Zeitbereichs- und Frequenzanalyse nicht, da hierbei die Information über zeitlich veränderliche Anteile schnell verloren geht. Da die Darstellung der Merkmale im Zeit- und Frequenzbereich bei der Diagnose aber von entscheidender Bedeutung sein kann, existieren hierfür, wie im Folgenden erläutert, verschiedene Verbunddarstellungsmethoden (Joint-Time-Frequency-Analysis).

- Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT): Die Anwendung der STFT wurde im Abschnitt zur Beschreibung der Analyseverfahren im Frequenzbereich erläutert. Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens mit dem Ziel einer erhöhten Frequenzauflösung wird in [Lehmann, 1997] beschrieben.
- Chirp-z-Transformation: Dieses Verfahren beruht auf einem Algorithmus, der auf der z-Transformation von Abtastfolgen basiert [siehe Stearns u. Hush, 1999]. Die Abtastwerte der Fourier-Transformation können mit Hilfe dieses Algorithmus über ein schmales Frequenzband effizient zu berechnet werden. Die Frequenzauflösung wird hierbei nur von dem numerischen Algorithmus begrenzt. Die Chirp-z-Transformation wird ähnlich wie das Frequenzlupenverfahren eingesetzt, mit dem Unterschied, dass die Datensätze sehr kurz sind.
- Wigner-Ville-Verteilung: Bei der Wigner-Ville-Verteilung wird das Grundproblem der Fourieranalyse, die unendlich große, periodische Basisfunktion $e^{(j\varpi t)}$, umgangen. Diese Basisfunktion ist zur Wiedergabe transients Signale eher schlecht geeignet. Die Grundgleichung der Wigner-Ville-Verteilung lautet

$$\text{WV}(\varpi, t) = \int_{-\infty}^{\infty} y\left(t + \frac{\delta}{2}\right) y^*\left(t - \frac{\delta}{2}\right) e^{-j\varpi t} d\delta,$$

wobei $y(t)$ die Zeitfunktion des Signals darstellt, $y^*(t)$ das konjugiert-komplexe Signal und $\varpi = 2\pi\nu$ die Kreisfrequenz. Die Verteilung $\text{WV}(\varpi, t)$ kann als Spektrum interpretiert werden, wobei gegenüber der Fourier-Transformation eine wesentlich höhere Analyseschärfe und eine höhere Zeit-Frequenz-Auflösung erzielt wird. Da die Abtastfrequenz mehr als das vierfache der Grenzfrequenz betragen muss, erfolgt in der Praxis die Anwendung der Pseudo-Wigner-Verteilung mit einer begrenzten Fensterlänge [Skerl u. a., 1994].

- Wavelet-Transformation: Im Gegensatz zur Fourier-Transformation, bei der das Signal in einzelne Sinuswellen zerlegt wird, erfolgt bei der Wavelet-Transformation eine Darstellung des Signalverlaufs mittels Einzelwellen (Wavelets Ψ)

der allgemeinen Form

$$\Psi(c, \Delta t) = \frac{1}{\sqrt{c}} \Psi\left(\frac{t - \Delta t}{c}\right).$$

Der Faktor Δt erlaubt eine Verschiebung (Translation) des Basis-Wavelets. Der Faktor c dient als Skalierungsfaktor zu Stauchung bzw. Dehnung der Funktion. Hinzu kommt eine frequenzabhängige Variation der Fenstergröße. Dadurch wird eine sehr gute Anpassung an den Signalverlauf ermöglicht. Bei Signalabschnitten mit einer hohen Frequenz nehmen diejenigen Koeffizienten große Werte an, deren zugehöriges Fenster klein ist. Bei Abschnitten mit niedriger Frequenz nehmen diejenigen Koeffizienten große Werte an, deren Fenster groß ist („Zoom-In“ bzw. „Zoom-Out“ Eigenschaft). Die Wahl des Wavelets erfolgt in Abhängigkeit des zu analysierenden Signals.

Hohe Frequenzanteile werden mit schmalen Zeitfenstern erfasst, während niedrige Frequenzanteile mit breiten Zeitfenstern erfasst werden. Dies bedeutet, dass sprunghafte Änderungen mit hohen Frequenzanteilen genauso gut erfasst werden können, wie langsame Veränderungen mit geringerer Frequenz. Die Merkmale häufig vorkommender Schwingungsursachen im Zeit-Frequenz-Bereich werden in [Dresig u. a., 1999] beschrieben. Bei der Wavelet-Analyse ist gegenüber der Wigner-Ville-Analyse kein Fehler durch den Rechenalgorithmus möglich und die Anforderungen an die Rechenkapazität fallen geringer aus.

Beispiele für die Anwendung der Wavelet-Transformation im Rahmen der Detektion von Zustandsänderungen finden sich beispielsweise in Stockmanns [2000].

3.3.2 Modellbasierte Verfahren

Paritätsraumverfahren

Das Paritätsraumverfahren beruht auf dem Vergleich von geeignet modifizierten Systemgleichungen $G_M(s) = y_M(s)/u(s)$ (sog. Paritätsgleichungen) mit gemessenen Größen $y(s) = G_P(s)u(s)$ des betrachteten Prozesses bei bekanntem Systemeingang $u(s)$. Aus der Differenz $y(s) - y_M(s) = r(s)$ zwischen der gemessenen Größe und der errechneten Größe, die Residuum genannt wird, kann eine Aussage über das Vorhandensein einer Änderung im Prozess, bedingt durch eine Schädigung oder erhöhte Beanspruchung, getroffen werden. Die Entkopplung dieser Information von anderen Einflüssen erfolgt durch eine geeignete Modifikation der Gleichung $G_M(s)$.

Im Frequenzbereich errechnet sich das Residuum wie in Abbildung 3.9 skizziert, zu

$$r(s) = G_F(s)[y(s) - G_M(s)u(s)].$$

Die Übertragungsfunktion $G_F(s)$ repräsentiert hierbei einen nachgeschalteten Filter, über den ebenfalls eine Entkopplung der einzelnen Residuen untereinander erreicht werden kann.

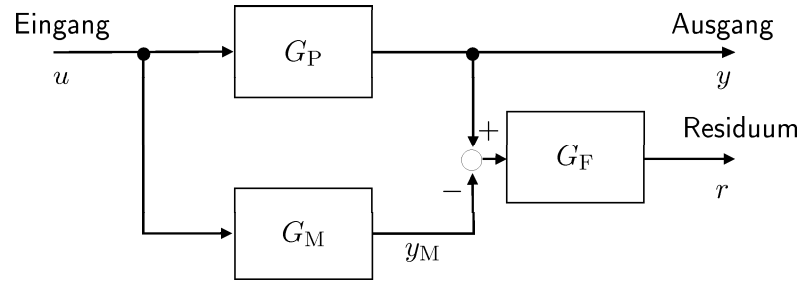


Abbildung 3.9: Schema des Paritätsraumverfahrens [nach Frank, 1994]

Mehrgrößensysteme führen zu mehreren Residuen. Dies hat den Vorteil, dass eine größere Informationsmenge zur Identifizierung der vorliegenden Schädigung bereitsteht. Zur Darstellung der Paritätsgleichung für Mehrgrößensysteme eignet sich die Zustandsraumdarstellung. Das System wird beschrieben als

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad \text{und} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t). \quad (3.36)$$

Hierbei ist \mathbf{A} die Systemmatrix, \mathbf{B} die Eingangsmatrix und \mathbf{C} die Ausgangsmatrix. Die Vektoren \mathbf{u} , \mathbf{x} und \mathbf{y} bilden den Eingangs-, den Zustands- sowie den Ausgangsvektor des Systems.

Das mehrfache Differenzieren der Ausgangsgleichung (3.36) führt zu dem Gleichungssystem

$$\mathbf{y}_F(t) = \mathbf{Q}_B \mathbf{x}(t) + \mathbf{Q} \mathbf{u}_F(t) \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{y}(t) \\ \dot{\mathbf{y}}(t) \\ \ddot{\mathbf{y}}(t) \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots \\ \mathbf{C}\mathbf{B} & 0 & 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B} & \mathbf{C}\mathbf{B} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \ddot{\mathbf{u}}(t) \\ \vdots \end{bmatrix}.$$

Das Residuum ergibt sich, wie in Abbildung 3.10 skizziert, zu

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{W}\mathbf{y}_F(t) - \mathbf{W}\mathbf{Q}\mathbf{u}_F(t),$$

wobei die Matrix \mathbf{W} zur Residuenerzeugung derart gewählt werden muss, dass das Residuum im Fall einer nichtschädigenden Belastung den Wert Null annimmt. Hieraus folgt die Bedingung $\mathbf{W}\mathbf{Q}_B = 0$. Die Matrix \mathbf{D} bildet hierbei einen Differenzationsfilter.

Voraussetzungen für die Anwendung des Paritätsraumverfahrens sind die genauen Kenntnisse über die Prozessparameter.

Parameterschätzung

Das Verfahren der Parameterschätzung beruht auf der Annahme, dass sich eine Änderung, bedingt durch eine Schädigung in einer Komponente eines dynamischen Systems, in bestimmten physikalischen Koeffizienten \mathbf{p} widerspiegelt (beispielsweise Reibung, Masse, Viskosität etc.). Die Beanspruchung bzw. Schädigung der Einheit

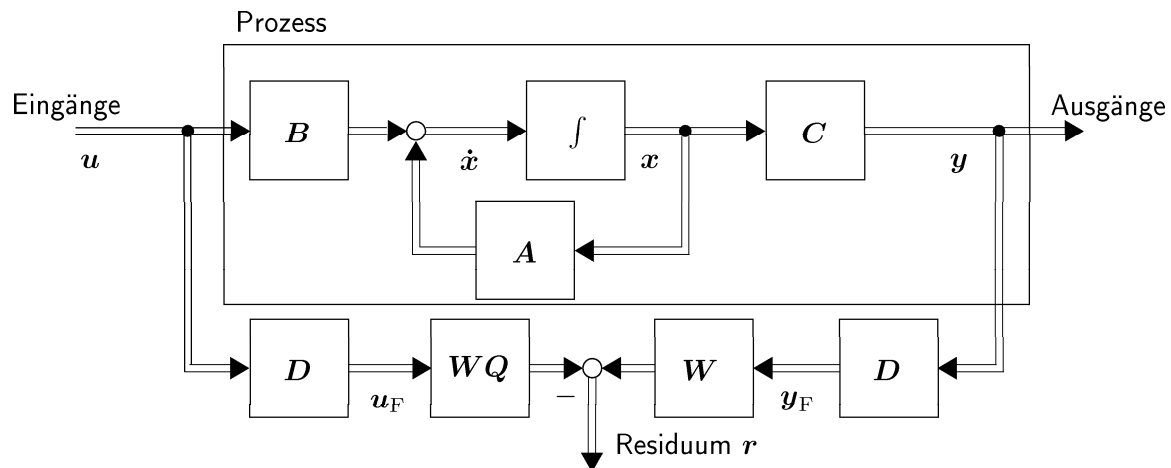


Abbildung 3.10: Schema des Paritätsraumverfahrens im Zustandsraum [nach Isermann, 1997]

kann somit als unzulässige Änderungen $\Delta \mathbf{p}$ eines nominalen Koeffizientenvektors \mathbf{p}_0 beschrieben werden. Durch Schätzung der mathematischen Parameter $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}$ eines nichtparametrisierten mathematischen Modells des Systems, der Umrechnung dieser Parameter in physikalische Prozesskoeffizienten \mathbf{p} und dem Vergleich mit den nominalen Koeffizienten \mathbf{p}_0 können Abweichungen und somit Schädigungen entdeckt werden. Der gesamte Vorgang ist schematisch in Abbildung 3.11 dargestellt. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein eines präzisen mathematischen Modells des Prozesses.

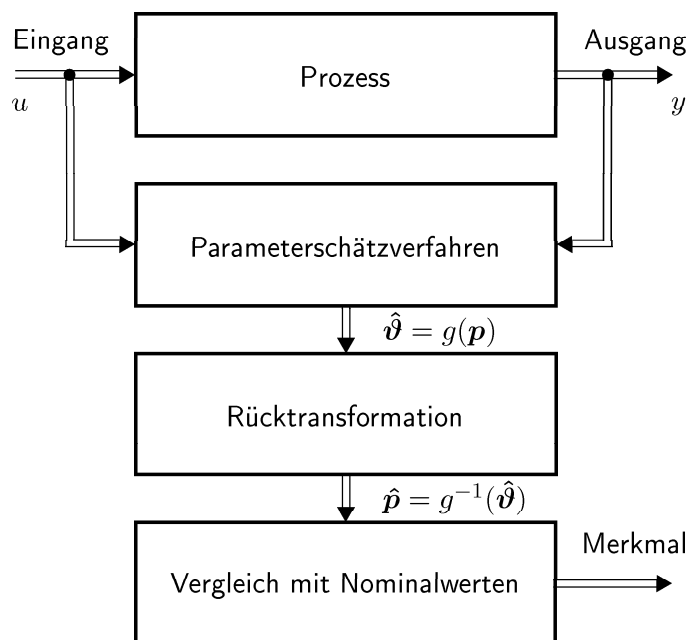


Abbildung 3.11: Schema der Diagnose mit Hilfe der Parameterschätzung [nach Frank, 1996]

Das dynamische Verhalten des technischen Systems wird durch eine lineare Differenzialgleichung der Form

$$y(t) + a_1 \dot{y}(t) + \dots + a_n y^{(k)}(t) = b_0 u(t) + b_1 \dot{u}(t) + \dots + b_m u^{(l)}(t)$$

beschrieben. Hierbei gilt:

$y^{(i)}$ = i -te Ableitung des Ausgangs

$u^{(j)}$ = j -te Ableitung des Eingangs

a_i = i -ter Koeffizient

b_j = j -ter Koeffizient

Vereinheitlichend wird das Modell des Systems durch den Datenvektor $\boldsymbol{\psi}^T$ und den Parametervektor $\boldsymbol{\vartheta}$ in der Form

$$y(t) = \boldsymbol{\psi}^T \boldsymbol{\vartheta} = [-\dot{y}(t) \dots -y^{(k)}(t); u(t) \dots u^{(l)}][a_1 \dots a_n \ b_0 \dots b_m]$$

dargestellt. Der Parametervektor $\boldsymbol{\vartheta}$ hängt nichtlinear von einem oder mehreren physikalischen Prozesskoeffizienten \boldsymbol{p} ab, wie beispielsweise Steifigkeiten, Reibungskoeffizienten, Widerständen o. ä. [Isermann, 1997].

Schädigungen im System führen zu einer Änderung der physikalischen Prozesskoeffizienten $\Delta \boldsymbol{p}$ und damit zu einer Änderung der mathematischen Prozessparameter $\Delta \boldsymbol{\vartheta}$. Als Folge ändert sich das Ausgangssignal $\Delta y(t)$ zu

$$\Delta y(t) = \boldsymbol{\psi}^T \Delta \boldsymbol{\vartheta} + \Delta \boldsymbol{\psi}^T \boldsymbol{\vartheta} + \Delta \boldsymbol{\psi}^T \Delta \boldsymbol{\vartheta}.$$

Ein Vergleich der geschätzten mathematischen Parameter $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}$ bzw. der daraus resultierenden physikalischen Prozesskoeffizienten $\hat{\boldsymbol{p}}$ mit den zugehörigen Nominalwerten kann als Merkmal zur Detektion von Schädigungen dienen.

Gegebenenfalls kann die Rücktransformation von $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}$ nach $\hat{\boldsymbol{p}}$ vernachlässigt werden und die Informationen aus den Parametern $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}$ können direkt zur Merkmalsgewinnung genutzt werden [Han u. Frank, 1996]. Die Rücktransformation ist unter Umständen nicht eindeutig. Eine Aufarbeitung der Vorgehensweise der Rückverfolgung sowie ein Vorschlag zur echtzeitfähigen Transformation finden sich in [Rückwald, 1993].

Zur Parameterschätzung werden verschiedene Verfahren eingesetzt, wobei das Residuum $r(t) = y(t) - \boldsymbol{\psi}^T(t) \hat{\boldsymbol{\vartheta}}$ bzw. $r(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ als antreibendes Eingangssignal des Verfahrens dient und nach einer spezifischen Verlustfunktion V minimiert wird. Der Vektor $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}$ beschreibt den Parametervektor auf Basis der geschätzten Prozesskoeffizienten $\hat{\boldsymbol{p}}$. Unter der Annahme, dass sich eine Schädigung auf die Parameter des Prozesses auswirkt, steigt der Wert des Residuums $r(t)$ bei einer Schädigung an. Das Parameterschätzverfahren versucht diesen Fehler durch Änderung der Modellparameter zu eliminieren.

Häufig eingesetzte Verfahren zur Schätzung der Parameter sind die Methode der Kleinsten Fehlerquadrate, die Bayes-Methode, das Maximum-Likelihood Verfahren, die rekursive Methode der Kleinsten Fehlerquadrate, der Einsatz künstlicher Neuronaler Netze sowie weitere Verfahren.

Da die Verfahren zur Parameterschätzung ein Residuum als antreibendes Signal benötigen, ist der Einsatz für ungeschädigte Einheiten mit $y(t) = \hat{y}(t)$ problematisch.

Beobachter

Bei dem Verfahren des Beobachters werden Größen oder Zustände des Prozesses mit Hilfe von mathematischen Modellen berechnet. Das Residuum als ausschlaggebende Größe zur Detektion von Änderungen ergibt sich als Differenz zwischen errechneten (geschätzten) Größen und gemessenen Größen. Es ist ebenfalls möglich, das Residuum aus der Differenz der geschätzten Größen unterschiedlicher Beobachter oder aus der Differenz der einzelnen Schätzwertfehler zu bilden.

Es werden zwei verschiedene Ansätze des Beobachterverfahrens unterschieden: der Ausgangsbeobachter und der Zustandsbeobachter.

– Ausgangsbeobachter

Die Idee hierbei ist, Ausgangsgrößen eines Prozesses zu rekonstruieren und die Differenz zwischen geschätzter und realer Größe bzw. eine Funktion dieser Differenz als Residuum zu nutzen. Die Differenz $\mathbf{r} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}$ zwischen dem realen Ausgangsvektor \mathbf{y} und dem rekonstruierten Ausgangsvektor $\hat{\mathbf{y}}$ wird über eine Verstärkungsmatrix \mathbf{H} rückgekoppelt. Eine Prinzipskizze eines Ausgangsbeobachters ist in Abbildung 3.12 gegeben.

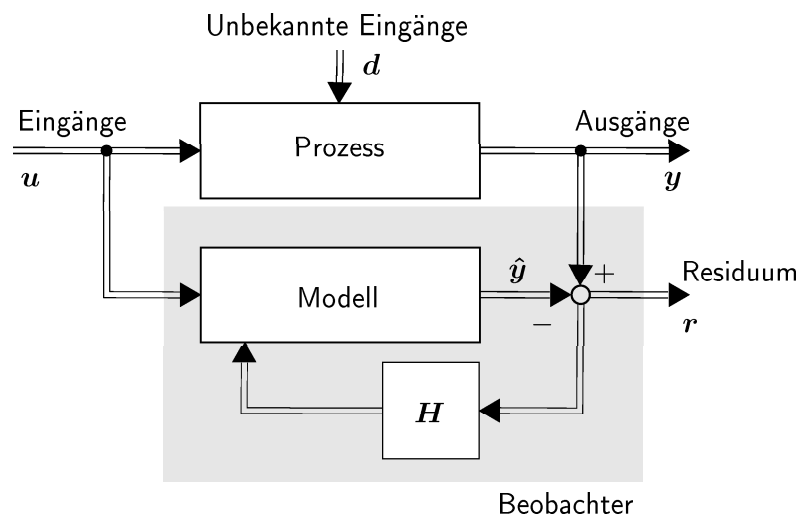


Abbildung 3.12: Struktur eines Ausgangsbeobachters

Die Rückkopplung dient der Kompensation von unterschiedlichen Anfangsbedingungen zwischen Modell und Prozess, zur Stabilisierung des Beobachters bei instabilem Prozess und ist der zentrale (dynamische) Mechanismus zur Konvergenz von Schätzung und Original. Für die Schadensdetektion muss \mathbf{H} derart gewählt werden, dass für das Residuum im schadensfreien Fall die Bedingung $\mathbf{r}(t) = 0$ gilt und für den geschädigten Fall $\mathbf{r}(t) \neq 0$. Beide Bedingungen müssen unabhängig von unbekannten Eingängen \mathbf{d} sein. Ist dies nicht möglich, ist $\mathbf{r}(t) \neq 0$ im schadensfreien Fall. Als Entscheidungskriterium wird dann der schadigungsbedingte Anteil des Residuums genutzt. Eine Schädigung würde als erkannt gelten, wenn \mathbf{r} einen Schwellwert überschreitet, der oberhalb der Amplitude der Wirkung der unbekannten Eingänge \mathbf{d} liegt.

Die Residuen sollen Schädigungen unabhängig von unbekannten Eingängen und Prozessabweichungen erkennen können [Frank, 1996]. Hierzu werden verschiedene Verfahren der Entkopplung eingesetzt [Frank u. a., 2000].

Die Bedeutung der Entkopplung für die Praxis liegt darin, dass gegebenenfalls kleine Schädigungen bei beliebig großen Modellgenauigkeiten detektiert werden können. Kenntnisse über die Größe und den zeitlichen Verlauf der Schädigung oder der unbekannten Eingänge müssen nicht vorhanden sein. Hierdurch ist es möglich, rein qualitativ bekannte Schädigungsformen bei kleinen Ausprägungen aus der Menge der unbekannten Eingänge und Modellierungsfehler heraus detektieren zu können. Dies ist vor allem von Bedeutung, da die Übereinstimmung zwischen Modell und Realität und die Berücksichtigung aller möglichen, bekannten Eingänge des Systems üblicherweise nicht immer gewährleistet werden kann. Die vollständige Entkopplung ermöglicht trotz dieser Mängel eine zuverlässige Detektion von Schädigungen, führt jedoch zu einem erhöhten Entwurfsaufwand.

– Zustandsbeobachter

Dieser ist dem Ausgangsbeobachter prinzipiell ähnlich, nutzt aber die Schätzung innerer nicht messbarer Zustände zur Merkmalsgewinnung.

Beim Ansatz des Beobachters als Zustandsbeobachter wird der lineare Prozess im Zustandsraum in Form der Gleichungen (3.35) und (3.36) dargestellt. In Abbildung 3.13 ist die Struktur eines Zustandsbeobachters dargestellt. Der Beobachter besteht neben dem Prozessmodell aus einem Residuum $r = y - \hat{y}$ und der Rückführmatrix H .

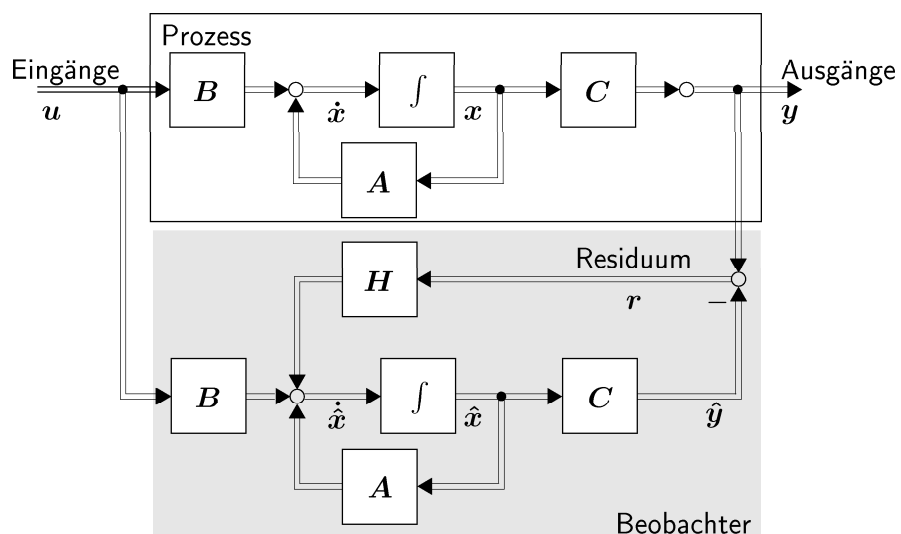


Abbildung 3.13: Struktur eines Zustandsbeobachters

Unter der Annahme, dass die Systemmatrix \mathbf{A} , die Eingangsmatrix \mathbf{B} und die Ausgangsmatrix \mathbf{C} bekannt sind, werden nach

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{H}\mathbf{r}(t) \quad \text{und} \\ \mathbf{r}(t) &= \mathbf{y}(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t)\end{aligned}$$

unbekannte Zustände des Prozesses anhand der gemessenen Werte der Eingänge \mathbf{u} und Ausgänge \mathbf{y} geschätzt.

Der Schätzfehler $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ zwischen der tatsächlichen Änderung der Zustandsgröße $\dot{\mathbf{x}}(t)$ und der geschätzten Änderung $\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t)$ ergibt sich aus

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = [\mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C}][\mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)].$$

Durch eine geeignete Wahl der Rückführmatrix \mathbf{H} wird der Beobachter stabil und die Differenz $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)$ geht gegen Null. Hierzu existieren in der Literatur zahlreiche und bewährte Verfahren.

Der Proportional-Integral-Beobachter bildet eine Erweiterung des Anwendungsfelds klassischer Beobachter durch die Möglichkeit, zusätzliche unbekannte, additiv auf das betrachtete System einwirkende, äußere Effekte $\hat{\mathbf{n}}$ zu schätzen [Söffker u. Müller, 1995; Söffker, 1996; Abicht u. a., 2001]. Durch die Kombination von Schätzungen der Zustände und äußerer Effekte können multiplikative Veränderungen erfasst und diagnostiziert werden. Der PI-Beobachter arbeitet daher prinzipiell wie ein klassischer Störgrößenbeobachter [Davison, 1972; Hippe u. Wurmthaler, 1985; Müller, 1989], wobei die Zustandserweiterung als zusätzliche integrale Rückführung des Residuums aufgefasst werden kann.

Die Schätzung des erweiterten Zustands erfolgt unter der Annahme von unbekannten Eingängen, Nichtlinearitäten und Modellungenauigkeiten [Söffker u. a., 1995; Söffker, 1999b; Krajcin u. Söffker, 2003]. Diese erweiterten Zustände können direkt ein Maß für eine eventuelle Schädigung des Systems darstellen [Söffker, 1997]. Ebenfalls ist es möglich, den Zusammenhang zwischen geschätzten Zuständen und erweiterten Zuständen zu nutzen (Abbildung 3.14).

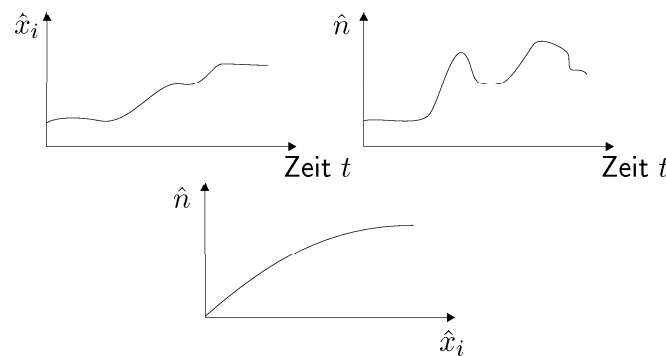


Abbildung 3.14: Auswertemöglichkeiten bei Anwendung eines PI-Beobachters

Eine Auslegung des Beobachters als adaptiver Beobachter ist ebenfalls möglich. Dieser ist in der Lage, Zustände und sich langsam verändernde Parameter zu schätzen und sein Modell adaptiv anzupassen. Hierdurch ist ein tieferes

Verständnis des Prozesses möglich, das allerdings auf Kosten eines erhöhten Rechenaufwands erfolgt [Frank u. a., 2000]. Ansätze zu nichtlinearen, quantitativen Beobachtern im Rahmen der Diagnose werden in [García, 1999] und [Kinnaert, 2003] beschrieben. Die vorgestellten Ansätze setzen eine nichtlineare Beschreibung des Systems voraus, wobei die Lösung des Detektionsproblems nur für bestimmte Systeme gelingt.

Voraussetzung für alle Verfahren des Beobachterverfahrens ist eine möglichst genaue Kenntnis der Prozessparameter, wobei dies für nichtlineare Systeme im verstärkten Maße gilt.

Qualitativ modellbasierte Verfahren

Zur Merkmalgewinnung mittels qualitativer Modelle existieren verschiedene Ansätze. Da im Rahmen dieser Arbeit die Beanspruchungen und Schädigungen in erster Linie quantitativ erfasst werden sollen, wird das Gebiet der qualitativen modellbasierten Verfahren zur Merkmalgewinnung nur kurz angerissen. Es sei jedoch angemerkt, dass die Umsetzung des SRCE-Konzepts auch mit qualitativen Größen möglich ist [vergleiche Rakowsky u. Söffker, 1997].

Als mögliche Ansätze seien hier die wissensbasierten Beobachter [Reiter, 1987; de Kleer u. Williams, 1987; Struss u. Dressler, 1989; Frank, 1996] genannt. Die eingesetzten qualitativen Modelle werden hier durch qualitative Simulationen [Kuipers, 1986; Manz, 1998] analysiert.

Ein weiterer Ansatz besteht in der Prozessmodellierung mit Fuzzy-Modellen. Diese werden nach [Frank u. a., 2000] unterteilt in regelbasierte, fuzzy-qualitative [Leitch u. Shen, 1993], fuzzy-funktionale [Patton u. a., 2000] und fuzzy-relationale Modelle [Amann, 2000].

Eine besondere Form der qualitativ modellbasierten Merkmalgewinnung ist der Einsatz von Künstlichen Neuronen Netzen (KNN). Diese eignen sich bei der Diagnose zur Erzeugung von Residuen, wenn die Struktur des Prozesses unbekannt ist. Es ist daher kein Prozessmodell notwendig. Durch das Training des künstlichen neuronalen Netzes werden die Gewichte des Netzes so gewählt, dass eine vorgegebene Funktion erfüllt wird. Die Eingangs- und Ausgangsdatenbasis für die Trainingsphase kann entweder direkt aus dem Prozess heraus ermittelt werden oder sie wird mit Hilfe eines möglichst genauen Simulationsmodells erstellt.

4 Safety and Reliability Control Engineering Konzept – SRCE-Konzept

Das Safety and Reliability Control Engineering (SRCE) Konzept wurde 1996/1997 von D. Söffker und U.K. Rakowsky entwickelt und erstmals in [Rakowsky u. Söffker, 1996; Söffker u. Rakowsky, 1997] veröffentlicht. Ziel des Konzepts ist es, eine zuverlässigkeitstechnisch optimale Betriebsweise für ein System zu ermöglichen. Hierbei sind die folgenden Fragestellungen von Bedeutung:

1. Wie groß ist die aktuelle Zuverlässigkeit des technischen Systems?
2. Verläuft die Entwicklung der Zuverlässigkeit des Systems noch wie erwartet bzw. wie weit hat sich das System von der Solltrajektorie entfernt?
3. Wann wird ein zuverlässigkeitstechnisch unvertretbarer Zustand eingenommen?
4. Welche Maßnahmen sind notwendig, um einen weiteren zuverlässigen Betrieb bis zur gewünschten Einsatzdauer zu gewährleisten?

Ziel des SRCE-Konzepts ist es, Antworten auf diese Fragen zu geben.

Ein erster Schritt besteht darin, eine quantitative Aussage über die aktuellen Zuverlässigkeitseigenschaften einer Einheit zu erhalten. Diese Aussage erfolgt mit Hilfe von Zuverlässigkeitskenngrößen wie Ausfallraten oder Ausfallwahrscheinlichkeiten (siehe Abschnitt 3.1.3). Im Gegensatz zu den klassischen Zuverlässigkeitskenngrößen, wie sie in der Zuverlässigkeitstheorie definiert sind [siehe Koslow u. Uschakow, 1979; Meyna u. Pauli, 2003; Bertsche u. Lechner, 2004], sind die Zuverlässigkeitskenngrößen im Rahmen des SRCE-Konzepts keine ausschließlich von der Zeit abhängigen Größen. Sie sind direkt von der vergangenen und aktuellen Betriebsweise $M_{1,\dots,i}$ abhängig. Diese wird repräsentiert durch die aktuelle Beanspruchung B_i sowie durch die Beanspruchungsgeschichte B_j ($j = 1, \dots, i - 1$). Die Beanspruchung des Systems wird als maßgeblicher Faktor zur Beeinflussung der Zuverlässigkeitseigenschaften im Betrieb betrachtet. Diese im Rahmen des SRCE-Konzepts gewonnenen Zuverlässigkeitskenngrößen werden, ebenfalls im Gegensatz zu den klassischen Zuverlässigkeitskenngrößen, nicht vor Inbetriebnahme berechnet, sondern kontinuierlich oder in zeitdiskreten Abständen online bestimmt. Sie liefern somit einen Schätzwert über die aktuellen, individuellen Zuverlässigkeitseigenschaften einer Einheit. Diese Form der Zuverlässigkeit wird als Feldzuverlässigkeit bezeichnet.

Die somit gewonnenen Informationen über die Zuverlässigkeit der Einheit(en) können zur Optimierung von Instandhaltungsstrategien in Richtung zustandsorientierter oder zuverlässigkeitsorientierter Instandhaltung genutzt werden. Im Rahmen eines Asset-Managementsystems sind diese Informationen ebenfalls von Interesse, geben sie doch Auskunft über die Eigenschaft einer Einheit, weiterhin ihre Funktion erwartungsgemäß auszuführen und somit über die Nutzbarkeit der Einheit.

Ein weiterer Schritt des SRCE-Konzepts ist die Ermöglichung einer ausfallvermeidenden Betriebsführung. Hierunter wird ein Ansatz verstanden, der es ermöglicht,

den probabilistischen Ausfall einer Einheit zu beeinflussen. Hiermit wird das Erreichen einer bestimmten maximalen Nutzungsdauer unter Einhaltung einer vorgegebenen maximalen Zuverlässigkeitskenngröße gewährleistet. Der Ansatz hierzu beruht auf der Änderung der Betriebsparameter und damit der Belastung der betroffenen Einheit. Die Auslöser eines solchen Regeleingriffs können vielfältiger Art sein. Das SRCE-Konzept kann somit als Notlaufkonzept eingesetzt werden. Dies ist vor allem bei Systemen sinnvoll, die kein Fail-Safe-Verhalten aufweisen oder für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten nicht oder nur schwer zugänglich sind. Beispiele hierfür sind Luft- und Raumfahrzeuge sowie autonome Unterseeboote. Bei diesen Systemen ist die sofortige Wartung und Instandsetzung während einer Mission nicht möglich. Die Systeme müssen ihre Aufgaben weiterhin erfüllen, zumindest bis sie für die Wartungs- und Instandsetzungszwecke wieder erreichbar sind oder einen Zeitpunkt erreicht haben, an dem sie sich selber reparieren bzw. rekonfigurieren können. Andere Systeme, die für den Einsatz des Konzepts prädestiniert wären, sind Systeme, bei denen ein unerwarteter Stillstand eine Gefahr für die Anlage, den Menschen oder die Umwelt darstellt oder aus monetären oder organisatorischen Gründen zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht gewünscht ist. Durch das Hinauszögern des Ausfalls kann Zeit gewonnen werden, um evtl. Gefahren abzuwehren, die Folgekosten zu minimieren oder die Wartung und Instandsetzung vorzubereiten. Dampfturbinen in Kraftwerken sind ein Beispiel für solche Systeme. Da das Abschalten einer Turbine aus der Vollast gefährlich und aufwendig ist, wäre es hier denkbar, die Turbine im Rahmen eines ausfallkontrollierten Notlaufs herunterzufahren bzw. weiter zu betreiben bis ein günstigerer Zeitpunkt für den Stillstand vorliegt. Ein weiteres Beispiel sind investitionsintensive Anlagen, die hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit stellen wie beispielsweise Walzwerke, Druckereipressen oder Braunkohlebagger. In der Arbeit [Dietl u. Rakowsky, 2005] als Beispiel wurde der Regeleingriff zur Optimierung bestimmter Betriebsabläufe eingesetzt, um die Stillstandzeiten einer Transferstraße bei unterschiedlichen Zeitpunkten der Werkzeugwechsel einzelner Stationen zu minimieren. Es konnte simulativ gezeigt werden, dass die Reduzierung bestimmter Betriebsparameter zu einer Minimierung der Anzahl der Stillstände, bedingt durch vorzeitigen Verschleiß und damit verbundene Werkzeugwechsel, führt. Gleichzeitig konnte die Ausbringung der Transferstraße trotz verminderter Leistungscharakteristik langfristig erhöht werden.

Der vermehrte Einsatz der Adaptronik in modernen Systemen ist ein zusätzliches potenzielles Anwendungsgebiet des SRCE-Konzepts. Adaptronische Komponenten müssen, neben ihrer sensorischen oder aktorischen Funktion, eine strukturelle Funktion im System übernehmen. Sie sind daher gegebenenfalls höheren oder anderen Beanspruchungen ausgesetzt, als klassische Sensoren und Aktoren. Als Beispiel seien hier Piezokeramiken erwähnt, deren Lebensdauer gravierend von der Art der Nutzung bzw. von der Höhe der Belastungen abhängt. Hinzu kommt, dass der Austausch einer adaptronischen Komponente auf Grund ihrer strukturellen Integrität sehr aufwendig ist. Die Überwachung der Zuverlässigkeitseigenschaften einer solchen Komponente ist daher zum Erhalt der Systemstruktur sowie zur Erfüllung der sensorischen und aktorischen Funktionalitäten und damit der integrierten Gesamtfunktionalität unerlässlich.

4.1 Phase Eins: Konfigurations- und Optimierungsphase

Der Aufbau des SRCE-Konzepts gliedert sich in zwei Phasen. Phase Eins beinhaltet das Sammeln der notwendigen Daten sowie das Aufstellen der Zusammenhänge zwischen ihnen. Diese Phase kann als Konfigurations- und Optimierungsphase bezeichnet werden. Die hier gewonnenen Informationen sind das Kernstück des Konzepts. Aus diesem Grund sollte diese Phase sorgfältig ausgeführt werden, was einen längeren Zeitraum von Monaten oder Jahren für die Validierung und Optimierung beinhaltet. Das Grundschema der ersten Phase des Konzepts ist in Abbildung 4.1 dargestellt und wird im Folgenden näher erläutert.

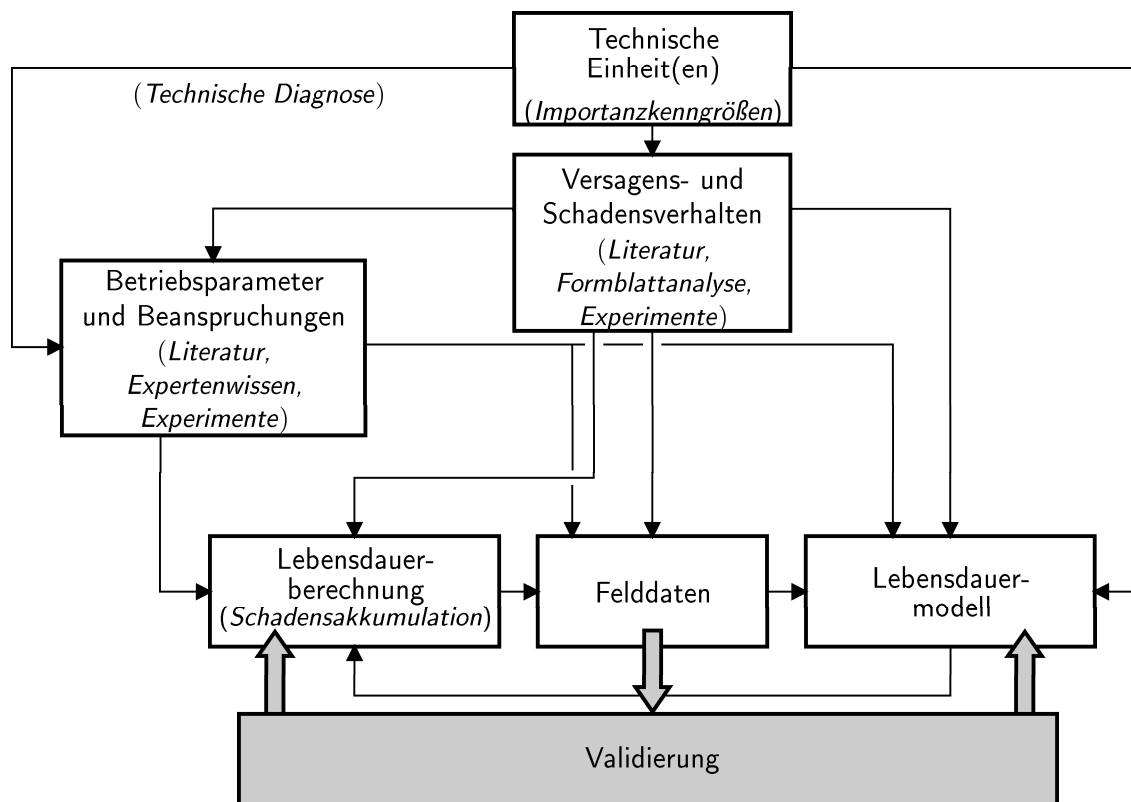


Abbildung 4.1: Aufbau des Safety and Reliability Control Engineering Konzepts, Phase Eins

Das SRCE-Konzept betrachtet die Zuverlässigkeit einzelner technischer Einheit(en) eines Gesamtsystems. Bei kleineren Gesamtsystemen kann es sinnvoll sein, sämtliche Einheiten des Systems mit Hilfe des SRCE-Konzepts zu überwachen und ihr Ausfallverhalten zu beeinflussen. Die resultierende Zuverlässigkeit des Gesamtsystems kann anschließend mit Ansätzen der Systemzuverlässigkeit [Koslow u. Uschakow, 1979; Meyna u. Pauli, 2003; Bertsche u. Lechner, 2004] berechnet werden. Bei größeren und komplexeren Systemen kann die Berechnung der Systemzuverlässigkeit komplizierter und umfangreicher ausfallen. Hier würde es sich empfehlen, nur die für die Systemzuverlässigkeit kritischen Einheiten zu überwachen. Zum Detektieren dieser kritischen Einheiten können beispielsweise Verfahren der Importanzkenngrößen

ßen genutzt werden (eine Übersicht dieser Verfahren ist in [Wolters u. Söffker, 2004a] gegeben).

Für jede zu berücksichtigende Einheit im SRCE-Konzept muss das für sie relevante Versagenskriterium ermittelt werden. Ebenfalls muss geprüft werden, ob speziell exponierte Bereiche (kritische Orte) existieren oder das Bauteil in allen Bereichen seiner Struktur versagen kann. Zur Aufdeckung der möglichen und relevanten Versagensformen sowie ihres lokalen Auftretens eignen sich, neben experimentellen Untersuchungen, Angaben aus der Literatur über ähnliche Einheiten sowie Verfahren der Formblattanalyse wie die Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Das Ergebnis solcher Untersuchungen zu dem Versagenskriterium und dem kritischen Ort kann beispielsweise der Verlust der Leitfähigkeit einer Kontaktstelle sein, der Anriss einer Struktur an einer Schweißnaht oder der Kurzschluss in einem integrierten Schaltkreis. Weiterhin lassen sich aus den Untersuchungen Schlüsse über die Schadensform als ausfallverursachenden Prozess ziehen. Als Beispiel seien hier Materialermüdung, Korrosion oder beanspruchungsbedingte Änderungen der Materialeigenschaften (spezifischer Widerstand, Leitfähigkeit etc.) genannt.

Sobald die technischen Einheiten und ihre Versagensformen sowie ihr Schadensverhalten identifiziert sind, gilt es, die zu Grunde liegenden Beanspruchungen B zu ermitteln. Diese resultieren aus den jeweiligen Betriebsweisen M mit den dazugehörigen Belastungen L wie Temperatur, Schwingungen, elektrische Felder, Drücke etc. (siehe Tabelle 3.1). Um hier die relevanten Belastungen aus der Gesamtzahl aller Belastungen herauszufiltern, sollten neben Informationen aus der Fachliteratur und ingenieurtechnischen Erfahrungen die Ergebnisse entsprechender Lebensdauerersuchsreihen genutzt werden. Die Ergebnisse solcher Lebensdauerersuche sind auf der einen Seite sehr zeit- und kostenintensiv, liefern andererseits aber eine, in Abhängigkeit der Übertragbarkeit der Versuche, exakte Aussage über die Beanspruchbarkeit der Einheit bezogen auf die relevante Schadensform.

Unter der Voraussetzung, dass die Versuche mit einer statistisch ausreichenden Anzahl an Prüfobjekten auf unterschiedlichen Belastungs- bzw. Beanspruchungsstufen bis zum relevanten Versagenskriterium durchgeführt werden, lässt sich ein Lebensdauermodell, wie exemplarisch in Abschnitt 3.2.2 vorgestellt, für die Einheit und ihre Schädigungs- und Versagensmechanismen parametrisieren. Wenn kein Modell für den vorliegenden Belastungs- bzw. Beanspruchungsfall oder das Versagenskriterium existiert, muss das Modell, entsprechend den im Rahmen der Lebensdauerersuche gewonnenen Erkenntnissen, neu erstellt werden.

Die Abbildung 3.5 macht deutlich, dass mit abnehmender Beanspruchung bzw. Belastung die Lebensdauer ansteigt. Ist die Beanspruchung nicht direkt detektierbar, kann die Lebensdauer mit der Belastung als eingehende Größe dargestellt werden. In den meisten Fällen kann als Vereinfachung davon ausgegangen werden, dass gleich hohe Belastungen bei gleichartigen Bauteilen zu reproduzierbaren Beanspruchungen führen. Dies gilt nur für den Fall, dass eine Belastungsgröße auftritt. Sind zwei oder mehr Belastungsgrößen vorhanden, können Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Belastungen und den resultierenden Beanspruchungen entstehen und der vereinfachte Ansatz ist auf seine Gültigkeit zu überprüfen. Die relevante(n) Größe(n) muss/müssen im Rahmen des SRCE-Konzepts kontinuierlich bzw. zeitdiskret online

und in-situ erfasst werden können, wozu sich je nach Einheit und Beanspruchung ausgesuchte Verfahren der technischen Diagnose (Abschnitt 3.3) eignen.

Wenn das Versagen der Einheit erst nach mehreren Nutzungen mit unterschiedlichen Beanspruchungshöhen erfolgt, akkumulieren sich die Teilschädigungen der einzelnen Nutzungen bis zum Versagensfall gemäß der zu Grunde liegenden Schadensakkumulationshypothese (Abschnitt 3.2.3). Diese Schadensakkumulation stellt die mathematische Formulierung der Zusammenhänge zwischen beanspruchenden Nutzungen und Versagen dar. Unter Einsatz einer solchen Akkumulationshypothese lassen sich im Weiteren Aussagen über den Zustand der Einheit bezüglich ihres Ausfalls und die zu erwartende Lebensdauer erstellen.

Auf Grund von vereinfachten Annahmen, Abweichungen der Laborergebnisse von der Realität und anderen Einflussfaktoren wird eine solche Akkumulationshypothese zu Beginn noch sehr ungenau sein. Um die Ungenauigkeiten zu beseitigen, müssen folgende Punkte optimiert werden:

- a) Die Datenbasis des Lebensdauermodells muss vergrößert werden, um die Aussagefähigkeit zu verfeinern. Gegebenenfalls müssen andere Beanspruchungen als bisher angenommen oder Beanspruchungskombinationen berücksichtigt werden.
- b) Die Akkumulationshypothese muss den neu hinzugewonnen Erkenntnissen angepasst werden (Verifikation der Hypothese).

Dies geschieht optimalerweise mit Informationen aus Felddaten. Dies können Nutzungs-, Wartungs-, Inspektions- und Ausfalldaten von gleichartigen oder ähnlichen Einheiten im Betrieb sein. Die Art der Daten, die benötigt wird, ergibt sich aus den als relevant ermittelten Größen zur Bestimmung der Beanspruchungen und den zugehörigen Belastungen und Betriebsarten, der Akkumulationshypothese sowie dem für das Bauteil entscheidenden Versagens- und Schadensverhalten. Die Ergebnisse der Lebensdauerberechnung können über einen mehrmonatigen Zeitraum mit den Ergebnissen der Felddaten verglichen werden. Wenn die Validierung eine Abweichung ergibt, können die Module der Lebensdauerberechnung sowie das Lebensdauermodell modifiziert oder ausgetauscht werden. Dieser Prozess kann sich im Optimalfall solange wiederholen, bis die Ergebnisse der Lebensdauervorhersage mit den realen Ergebnissen, repräsentiert durch die Felddaten, ausreichend übereinstimmen. Ist dies der Fall, kann davon ausgegangen werden, dass

1. die entscheidenden Beanspruchungsgrößen berücksichtigt werden und
2. die Akkumulationshypothese als Schadensakkumulationstheorie den Schädigungsprozess in optimaler Weise beschreibt.

4.2 Phase Zwei: Anwendung

In der zweiten Phase des Konzepts erfolgt dessen eigentliche Anwendung. Die Vorgehensweise ist schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt.

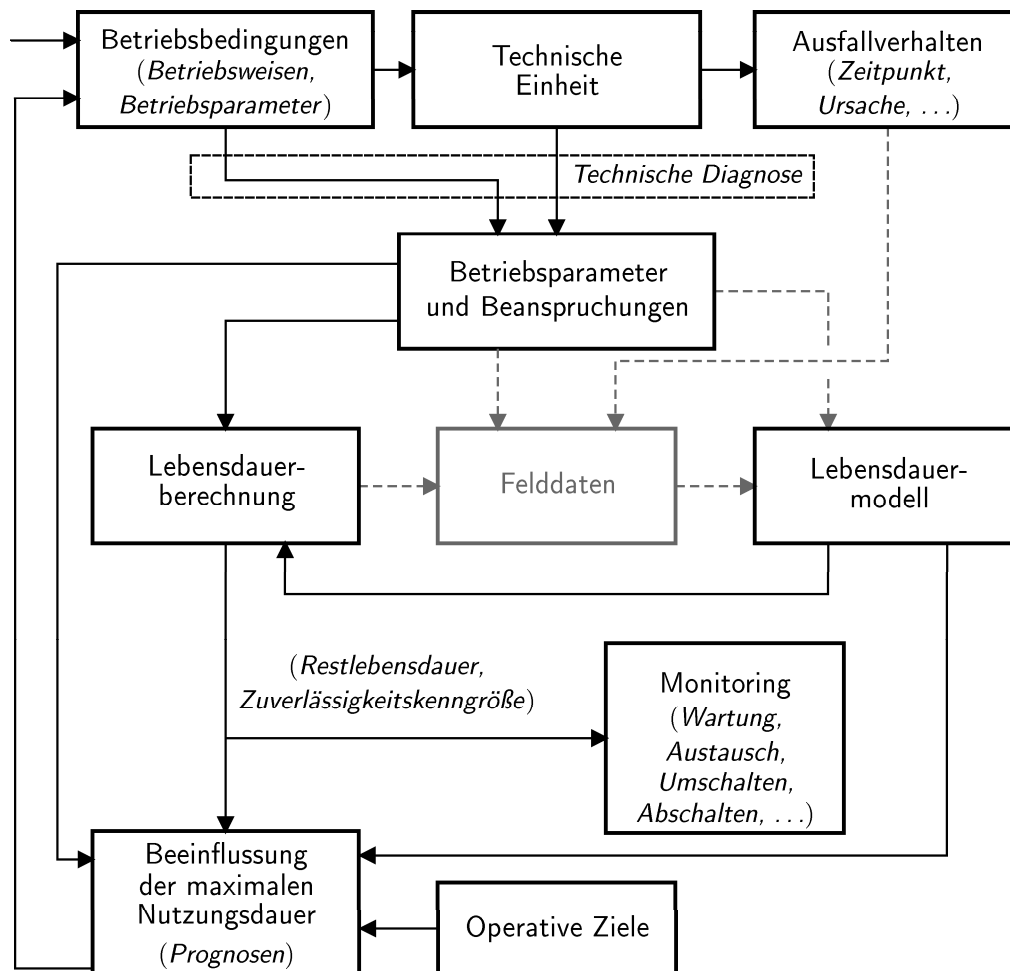


Abbildung 4.2: SRCE-Konzept, Zweite Phase

Das SRCE-Konzept aus Phase Eins kann jetzt an einer entsprechenden Einheit im Betrieb eingesetzt werden. Diese Einheit bzw. das zugehörige Gesamtsystem wird nach seiner Funktionsweise sowie seiner Zielvorgabe unter bestimmten Betriebsbedingungen betrieben. Diese Betriebsbedingungen können in Form von Betriebsweisen (bestimmte Maschinen- bzw. Anlagenmanöver) und Betriebsparametern (Mess- und Steuersignale sowie Systemzustände) ausgedrückt werden. Das reale Ausfallverhalten der Einheit, welches als Konsequenz der Betriebsbedingungen folgt, ist unbekannt.

Mit Hilfe geeigneter Verfahren der Messtechnik und der technischen Diagnose (siehe Kapitel 3.3) können jetzt die in Phase Eins des Konzepts ermittelten Beanspruchungsgrößen bzw. die zur Darstellung der Beanspruchung notwendigen Messgrößen erfasst werden. Zusätzlich werden die Betriebsbedingungen mitgeschrieben, um einen Zusammenhang zwischen bestimmten Betriebsbedingungen und resultierenden Beanspruchungen zu erhalten.

Das in Phase Eins optimierte Modell zur Lebensdauervorhersage berechnet aus den Beanspruchungsgrößen und dem Lebensdauermodell eine aktuelle Zuverlässigkeitskenngröße sowie die maximal zu erreichende Nutzungsdauer. Diese gibt die

Anzahl der Nutzungen der Einheit beim Erreichen einer vorgegebenen, als kritisch eingestuften Zuverlässigkeitskenngröße an.

Die auf diese Weise gewonnenen Informationen können in zweierlei Weise eingesetzt werden:

1. Im Rahmen des Monitoring wird der Systemzustand bzgl. des Ausfalls beobachtet und überwacht. Sollte die Zuverlässigkeitskenngröße eine kritische Größe erreichen, können gezielt Maßnahmen wie Wartung, Instandsetzung, Reparatur oder Abschalten der Einheit aktiviert werden.
2. Bei der Beeinflussung der maximalen Nutzungsdauer wird das System nach vorgegebenen Zielvorgaben geregelt. Diese Zielvorgaben können operative Ziele, wie das Erreichen einer vorgegebenen Nutzungsdauer, das Maximieren der Nutzungsdauer einer Einheit oder die Einhaltung bestimmter Zuverlässigkeitskenngrößen sein. Entsprechend den Modellen für die Lebensdauerberechnung sowie dem Lebensdauermodell werden Prognosen über den weiteren Verlauf der Beanspruchungen berechnet. Diese können auf unterschiedlichen Annahmen beruhen, die neben *worst-* und *best-case* Annahmen den bisherigen Beanspruchungs-Zeit-Verlauf berücksichtigen. Je nach Ergebnis der Prognosen ist ein regulierender Eingriff in die Betriebsbedingungen notwendig, wenn die Zielvorgaben weiterhin erfüllt werden sollen.

Diese Eingriffe in die Betriebsbedingungen werden auf Grund des gewonnenen Zusammenhangs zwischen Betriebsbedingungen und Beanspruchungshöhen ermittelt. Ziel eines solchen Eingriffs ist üblicherweise die Vermeidung hoher Beanspruchungen. Somit erfolgt ein Eingriff in die Leistung des Systems. Dies ist nicht immer möglich oder nicht immer erwünscht, wenn hierdurch beispielsweise bestimmte Faktoren eines Herstellungs- oder Bearbeitungsprozesses (Ausbringung, Taktzeiten, Qualität etc.) beeinträchtigt sind. Aus diesen Gründen ist ein solcher Eingriff nur dann sinnvoll, wenn die Funktionalität des Systems nicht vollständig verloren geht und eine Reduzierung der Leistung durch einen Gewinn an Zuverlässigkeit und/oder Sicherheit bzw. zur Vermeidung oder Reduzierung von Folgekosten gerechtfertigt ist. Letztere entstehen dann, wenn der Ausfall der Einheit eintritt, ohne dass Maßnahmen zur Schadensreduzierung oder -behebung getroffen werden konnten. Die online ermittelte, beanspruchungsabhängige Zuverlässigkeitskenngröße ist somit ein Indikator für eine zuverlässigkeitsbasierte Instandhaltung.

4.3 Bisherige Arbeiten und ähnliche Ansätze

Im Folgenden werden einige Vorarbeiten im Zusammenhang mit dem SRCE-Konzept vorgestellt. Somit wird deutlich, welche Fragestellungen abgehandelt wurden und welche noch ungelöst sind. Dies ermöglicht eine Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit in den Gesamtkontext der Entwicklung des SRCE-Konzepts.

In [Rakowsky u. Söffker, 1996] werden die ersten Ideen des Konzepts vorgestellt. Es wird ein grobes Schema skizziert, wie Signalraten in Zuverlässigkeitskenngrößen

überführt werden können. Es werden verschiedene Ansätze der Systemtheorie bzw. der Fehlerdetektion zur Erfassung der Beanspruchungsgrößen vorgeschlagen. Dies können modellbasierte Verfahren wie Beobachterverfahren, Parameteridentifikationsverfahren oder kombinierte Ansätze sein. Eine Robustheit der Verfahren gegenüber Modellfehlern und -abweichungen muss gewährleistet sein. Aus den Ergebnissen dieser Verfahren werden die Zuverlässigkeitskenngrößen direkt mit Hilfe der Prozessgrößen oder unter Einsatz von Expertensystemen bestimmt. Die formale Darstellung der Aufgabe beschränkt sich auf die allgemeine Beschreibung eines Proportional-Integral-Beobachters (PI-Beobachter) zur Erfassung der Beanspruchungsgrößen, auf eine Prinzipskizze zur Umwandlung der Beanspruchungsgrößen in zugehörige Zuverlässigkeitskenngrößen durch ein Analyseteam sowie auf eine allgemeine Lebensdauerkennlinie für mechanisch beanspruchte Bauteile für ein gegebenes Quantil der maximalen Nutzungsdauer. Als Prinzipbeispiel wird ein angerissener Laval-Rotor betrachtet.

In [Söffker u. Rakowsky, 1997] wird das Prinzipbeispiel erneut aufgegriffen und die einzelnen Schritte werden detailliert. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Umwandlung einer mit Hilfe des PI-Beobachters geschätzten Risslänge in einem Laval-Rotor in eine zugehörige Ersatzspannung. Anschließend wird die Ersatzspannung mit einer zulässigen Beanspruchbarkeit verglichen. Diese wird aus den Lebensdauermodellen für eine vorgegebene Zuverlässigkeitskenngröße bestimmt und gilt als oberer Grenzwert der Ersatzspannung. Der Einfluss der Beanspruchungsgeschichte sowie der stochastische Charakter der zugrunde liegenden Daten werden in den oben genannten Beiträgen noch nicht berücksichtigt.

Die Anwendung des SRCE-Konzepts bei der Analyse der Systemzuverlässigkeit wird in [Rakowsky u. Söffker, 1997] erläutert. Hier wird ein Fuzzy-Ansatz zur Umwandlung der verschiedenen Beanspruchungsgrößen in Zuverlässigkeitskenngrößen vorgestellt. Dies setzt, wie die vorherigen Ansätze, ein ausreichendes Expertenwissen voraus.

In [Söffker u. Rakowsky, 1998] wird darüber hinaus zum ersten Mal der Einsatz einer Lebensdauerberechnung in Form der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner zur Einbeziehung der Beanspruchungsgeschichte berücksichtigt. Dieser Ansatz wird hier nicht weiter vertieft.

Erstmals in [Söffker, 1999a] wird eine Zuverlässigkeitskenngröße in Abhängigkeit der aktuellen und vergangenen Beanspruchungen mathematisch formuliert. Die stochastischen Informationen der Lebensdauermodelle werden hier noch deterministisch genutzt. Die Berechnung wird für ein bestimmtes Quantil der maximalen Nutzungsdauer durchgeführt. Somit ist die Zuverlässigkeitskenngröße selbst wieder mit einer bestimmten probabilistischen Genauigkeit versehen, die direkt mit dem gewählten Quantil zusammenhängt. Der Rechenweg wird in [Söffker u. Rinne, 1999; Söffker, 2000, 2001b] und [Söffker, 2001a] exemplarisch an den Ergebnissen einer experimentellen Versuchsreihe mit Kfz-Reifen angewendet. Als Ausfallkriterium wird hier das Platzen des Reifens betrachtet, wobei die Reifenschultertemperatur als ausschlaggebende Belastungsgröße genutzt wird. Es zeigt sich eine direkte Abhängigkeit der Zuverlässigkeitskenngröße von der gewählten Belastungshöhe. Eine Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften der Prüflinge (Streuung der maximalen Nutzungs-

dauer) in dem Lebensdauermodell wird nicht berücksichtigt. Die Fragestellungen bzgl. der maximalen Nutzungsdauer sowie die daraus gegebenenfalls resultierenden Maßnahmen bleiben in diesen Arbeiten ungelöst.

Der Einfluss der stochastischen Eigenschaften des Lebensdauermodells sowie der daraus resultierenden Streuungen für die akkumulierte und maximale Schädigung im Rahmen des SRCE-Konzepts wird erstmals in [Wolters u. Söffker, 2003] erwähnt. In dem Beitrag werden ebenfalls konkretere Skizzen zur Umsetzung einer Beanspruchungsbegrenzung aufgeführt.

In [Wolters u. Söffker, 2004b] werden die Bedingungen, die an das Lebensdauermodell im Rahmen des SRCE-Konzepts gestellt werden, aufgelistet und die Unabhängigkeit des Konzepts von einer bestimmten Schadensakkumulationshypothese verdeutlicht. Erste numerische Beispiele für eine normalverteilte akkumulierte und eine normalverteilte kritische Schädigung sowie die Begrenzung der mittleren Beanspruchung bei stochastischen Beanspruchungen werden gegeben. Die Begrenzung wird noch unabhängig von einer vorgegebenen quantifizierbaren Zielvorgabe gewählt.

Die Bedingungen, die bezüglich der Verteilungsparameter der maximalen Nutzungsdauer als Funktion der Beanspruchung zur Minimierung des Schädigungszuwachses erfüllt sein müssen, werden in [Wolters u. Söffker, 2005a] genannt. Hierbei wird auch auf das Optimierungsproblem bei der analytischen Bestimmung einer zielgerichteten Beanspruchungsvorgabe eingegangen.

In der Folgearbeit [Wolters u. Söffker, 2005b] wird die Interferenz zwischen einer normalverteilten akkumulierten Schädigung D und einer lognormalverteilten kritischen Schädigung D^* für konstante Beanspruchungsverläufe näherungsweise analytisch gelöst. Hierzu werden Polynome höherer Ordnung zur Näherung der komplexen Funktionen gewählt. Die Gültigkeit dieser Näherungen sind auf bestimmte Bereiche der Lösung begrenzt. Die Einbindung des SRCE-Konzepts innerhalb eines ganzheitlichen Konzepts zum Systementwurf und Betrieb zuverlässiger und ausfallsicherer komplexer Systeme wird erstmals in [Söffker u. a., 2005a] erwähnt und in [Söffker u. a., 2005b] weiter detailliert.

In [Wedmann u. Wallaschek, 2001] wird ein ähnliches Konzept unter dem Begriff Condition Monitoring und Lebensdauerbeobachter vorgestellt. Ziel ist hierbei die Lebensdauerüberwachung dynamisch beanspruchter Einheiten in mechatronischen Systemen. Die Vorgehensweise ist dem SRCE-Konzept sehr ähnlich, beschränkt sich aber auf die Erstellung von Informationen und Hinweisen für die zustandsorientierte Instandhaltung. Das Verfahren wurde zum Patent angemeldet [Haug u. a., 2004].

Ansätze zum online Erfassen von mechanischen Beanspruchungen an weniger komplexen Bauteilen mit Hilfe geeigneter Sensorik werden in [Betschon u. Birka, 1980] und [Schneidersmann, 1986] beschrieben. In [Betschon u. Birka, 1980] wird unter Einsatz eines S/N-Gebers [Harting, 1966] und eines Dehnungsmessstreifens das Lastkollektiv an der vorderen Radaufhängung eines Kraftfahrzeugs ermittelt. Die Arbeit beschränkt sich weitestgehend auf die Anwendung der Sensorik. Die stochastische Natur der eingesetzten Lebensdauerkenmlinie sowie die genaue Vorhersage der Restlebensdauer oder weiterer wichtiger Kenngrößen für den Betreiber erfolgt nicht. In [Schneidersmann, 1986] wird ein Gerät zur online Bestimmung der Schadenssumme eines Hubwerks vorgestellt. Durch eine Rechnersimulation soll aus der Schädigung

an der Messstelle auf die Schädigung an einer beliebigen anderen Schnittstelle der Einheit geschlossen werden. Die Berechnung erfolgt unter einer deterministischen Annahme des Lebensdauermodells. Eine Bewertung der abstrakten Schädigungszahl zur Unterstützung des Betreibers bei der Beurteilung der weiteren Funktionalität erfolgt nicht. In [Ridgetop Group, 2005] und [Bihler u. a., 2006] wird ein Mikrochip vorgestellt, der speziell zur Überwachung der Lebensdauer von Halbleiterelementen konzipiert wurde. Er erfasst die elektromagnetische, thermische und elektrische Belastung eines Chips und schreibt diese während der kompletten Lebensdauer mit. Hierzu werden Prognosezellen in den Chip integriert, welche schneller degradieren als die restlichen Schaltungen. Wenn die Prognosezellen bereits im Herstellungsprozess integriert werden, werden zusätzlich sämtliche Einflüsse des Herstellungsprozesses mitgeschrieben. Eine vorher definierte Ausfallcharakteristik der Testzellen muss entsprechend den Entwurfsparametern des Chips gewählt werden. Der Ausfall einer bestimmten Testzelle kennzeichnet somit eine definierte verbleibende Lebensdauer des Gesamtchips.

Andere Ansätze [Kim u. Kolarik, 1992; Chinnam, 1999] berechnen online die Zuverlässigkeit einer individuellen Einheit aus der Vorhersage bestimmter Leistungsparameter (Belastungen etc.). Die Vorhersage dieser Parameter erfolgt mit verschiedenen Modellen auf der Basis der bisherigen Messgrößen. Als Konsequenz des stochastischen Prozesses der Realisation der Zeitreihe unterliegt die Prognose ebenfalls einer bestimmten Verteilung. Die Ausfallwahrscheinlichkeit stellt die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten eines Grenzwertes für jeden Leistungsparameter dar. In der Annahme konstanter Grenzwerte der Leistungsgrößen sowie ihrer Festlegungen, die nur aus Untersuchungen einer Population stammen können, besteht aber noch ein Widerspruch. Diese Werte können nur bestimmte Quantile eines Grenzbereichs darstellen und die Wahl eines anderen Quantils könnte zu gravierenden Unterschieden in der Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit führen. Die Arbeiten konzentrieren sich in erster Linie auf die verschiedenen Ansätze zur Erfassung [Chinnam u. Mohan, 2002] und Prognose der Leistungsparameter [Lu u. a., 2001; Chinnam, 2002]. Ansätze über einen Rückschluss aus den gewonnenen Erkenntnissen werden teilweise genannt [Kim u. Kolarik, 1992], jedoch nicht weiter ausgeführt.

In [Pabst, 2005] werden die Dynamik der Zuverlässigkeitskenngröße und ihr Einfluss auf die Zustände eines Systems generell mit Hilfe der Systemtheorie als *Reliability Control System* beschrieben. Die Arbeit beschäftigt sich mit der mathematischen Integration der Zuverlässigkeitsdynamik in ein erweitertes Zustandsraummodell und nutzt einen differenzial-algebraischen Beobachteransatz zur Regelung der Zuverlässigkeitszustände.

5 Modellbildung und Simulation

Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den Modulen *Lebensdauerberechnung*, *Monitoring* und *Beeinflussung der maximalen Nutzungsdauer* aus Abbildung 4.2. Die Vorgehensweise zur Festlegung der kritischen Komponente, des Versagenskriteriums, der Elemente zum Erfassen der Betriebsparameter und der Beanspruchungen sowie zur Erstellung des Lebensdauermodells sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Ansätze hierfür wurden in den vorhergehenden Kapiteln aufgeführt. Auf Grund der Komplexität der Zusammenhänge sowie der Abhängigkeit der einzelnen konkreten Verfahren von der Art der betrachteten Einheit wird der Einsatz von modularen Software-Agenten im Rahmen des SRCE-Konzepts vorgeschlagen. Software-Agenten sind Programme, die autonom und in Interaktion mit ihrer Umgebung bestimmte Aufgaben erledigen oder Ziele verfolgen.

Im Falle des SRCE-Konzepts werden zwei Software-Agenten in der Konfigurationsphase (Abbildung 5.1) vorgeschlagen. Die Umgebung dieser beiden Agenten wird durch die technische Einheit und die zur Verfügung stehenden Informationen repräsentiert.

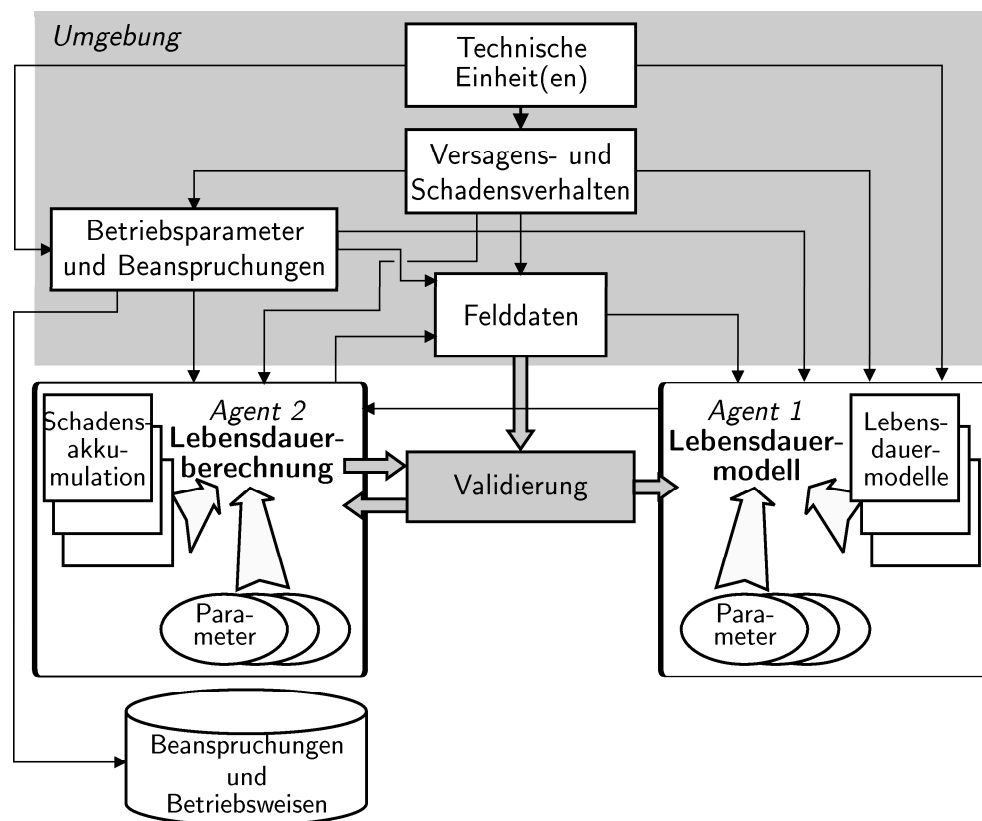


Abbildung 5.1: Software-Agenten in Phase Eins des SRCE-Konzepts

Der Agent 1 hat die Aufgabe, das Lebensdauermodell zu optimieren. Es ist im Rahmen des SRCE-Konzepts unerheblich, welches Lebensdauermodell gewählt wird. Entscheidend ist, dass das Modell möglichst genau den Zusammenhang zwischen den Beanspruchungen B und der Nutzungsdauer N wiedergibt. Dies beinhaltet die

stochastischen Eigenschaften von N und ihre Beschreibung durch entsprechend parametrisierte Verteilungsmodelle. Im Rahmen der Validierung soll der Agent in der Lage sein, die Parameter der ihm gegebenen Modelle fortlaufend zu optimieren. Es wäre ebenfalls möglich, den Agenten lernfähig auszulegen. In diesem Fall würde der Agent ein Lebensdauermodell als Initialmodell aus einer Bibliothek verschiedener Modelle wählen. Im Rahmen des Lernprozesses könnte dieses Modell angepasst, modifiziert oder verworfen werden. Nach erfolgreichem Lernprozess existiert ein für den gegebenen Fall optimales Lebensdauermodell. Vergleiche hierzu [Söffker u. Wolters, 2006].

Der Software-Agent 2 hat die Aufgabe, die Lebensdauerberechnung der Einheit durchzuführen. Hierzu benutzt er verschiedene Schadensakkumulationshypothesen. Diese können in Abhängigkeit der vorliegenden Beanspruchungen und des Versagenskriteriums vom Nutzer oder vom Agenten selbst aus einer Bibliothek gewählt werden. Im Rahmen der Validierung besteht die Möglichkeit, die Parameter der gewählten Hypothese zu optimieren oder eine neue Hypothese auszuwählen. Ebenfalls besteht eine weitere Möglichkeit darin, auch diesen Agenten lernfähig auszulegen. Dies hätte die Konsequenz, dass der Agent auf Basis der vorliegenden Beanspruchungen und des Versagenskriteriums eine Initialhypothese aus einem Katalog bekannter Hypothesen wählt. Anschließend ändert er diese Hypothese mit den zur Verfügung stehenden Eingangsgrößen im Rahmen der Validierung selbstständig ab oder entscheidet sich für eine andere Initialhypothese. Am Ende des Lernprozesses hat der Agent entweder die optimale Hypothese aus dem Katalog der zur Verfügung stehenden Hypothesen gewählt und entsprechend parametrisiert oder ein neues Schadensakkumulationsgesetz erstellt (vergleiche [Söffker u. Wolters, 2006]). Auch hier ist die Art der Hypothese für das SRCE-Konzept unerheblich.

In der Anwendungsphase kommt der Agent 3 zum Einsatz (Abbildung 5.2). Er berechnet auf Grund verschiedener Annahmen der zukünftigen Nutzung und den zu Grunde liegenden Modellen Prognosen über den Verlauf der Zuverlässigkeitskenngrößen sowie der maximal möglichen Nutzungsdauer. Diese Prognosen können optimalerweise den bisherigen Verlauf der Beanspruchungsgeschichte der Einheit berücksichtigen. Zu diesem Zweck verwaltet der Agent eine entsprechende Datenbank über den bisherigen Beanspruchungsverlauf der Einheit. Neben dem Überwachen der Einheit, im Sinne eines Condition Monitoring, dienen die Ergebnisse dieser unterschiedlichen modellbasierten Prognosen der Regelung des Systems zur Einhaltung der Zielvorgaben. Hierzu wird errechnet, wie groß die Beanspruchungen maximal sein dürfen, um die Zielvorgaben nicht zu verletzen. Über einen Abgleich dieser Beanspruchungsbeschränkung mit einer Datenbank, die sämtliche Betriebsweisen M und ihre resultierenden Beanspruchungen B beinhaltet, können bestimmte Betriebsweisen für die Einheit empfohlen, zugelassen oder untersagt werden. Diese Reglementierung der Betriebsweisen kann dann automatisiert über einen direkten Eingriff des Agenten in die Betriebsbedingungen der technischen Einheit oder über einen Hinweis an den Bediener erfolgen.

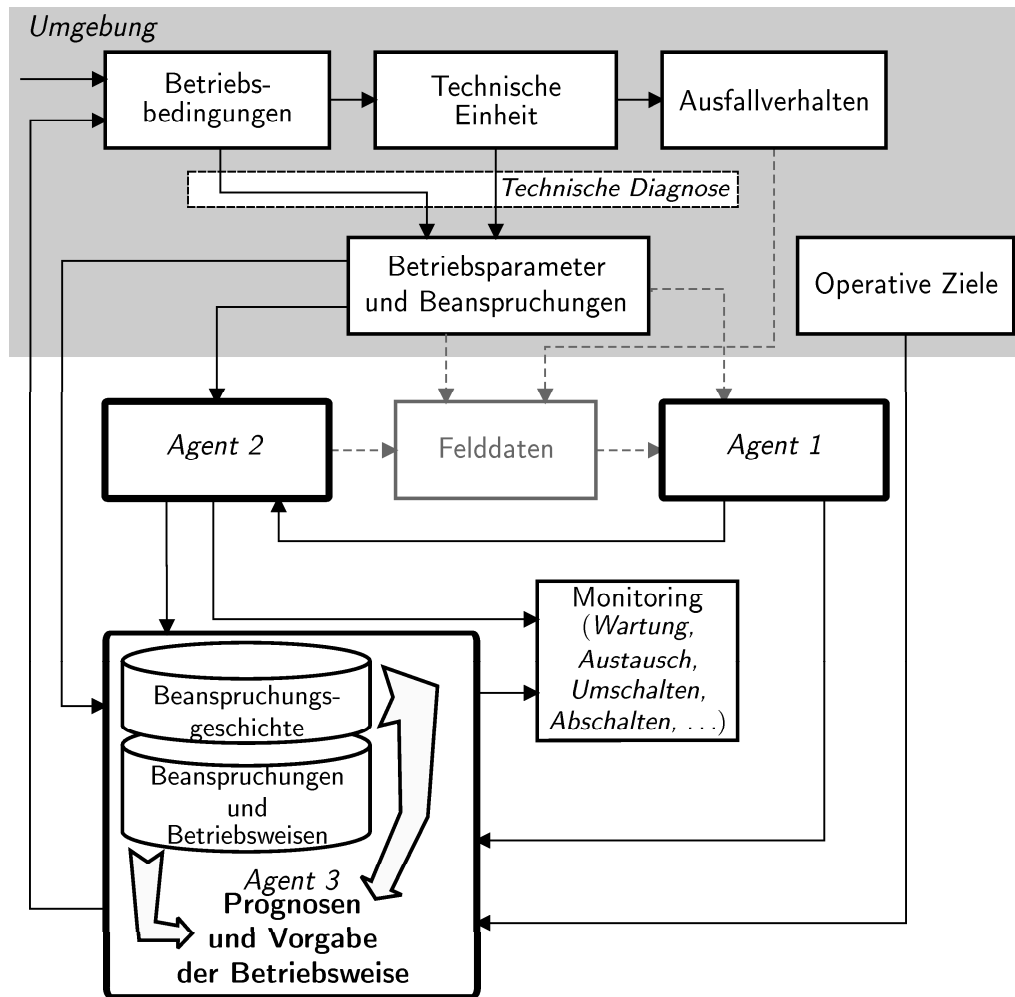


Abbildung 5.2: Software-Agenten in der Anwendungsphase des SRCE-Konzepts

5.1 Umsetzung

5.1.1 Anforderungen an das Lebensdauermodell im SRCE-Konzept

Das empirische Lebensdauermodell des Agenten 1 entspricht einem Lebensdauermodell nach Abbildung 3.5. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Beanspruchungen B_i und den jeweiligen Nutzungsdauern N_i . Auf jedem Beanspruchungsniveau muss eine ausreichend große Zahl an Tests erfolgt sein, um eine statistische Aussage über die maximale Nutzungsdauer treffen zu können. Sind die Beanspruchungen nicht detektierbar, können an ihrer Stelle die Belastungen L_i eingesetzt werden. Im Folgenden wird angenommen, dass die Beanspruchungen B_i als Eingangsgröße des Modells genutzt werden können. Die grafische Darstellung des Modells des Agenten 1 mit den notwendigen Parametern ist in Abbildung 5.3 wiedergegeben. Die Achsen können sowohl linear als auch logarithmisch skaliert sein.

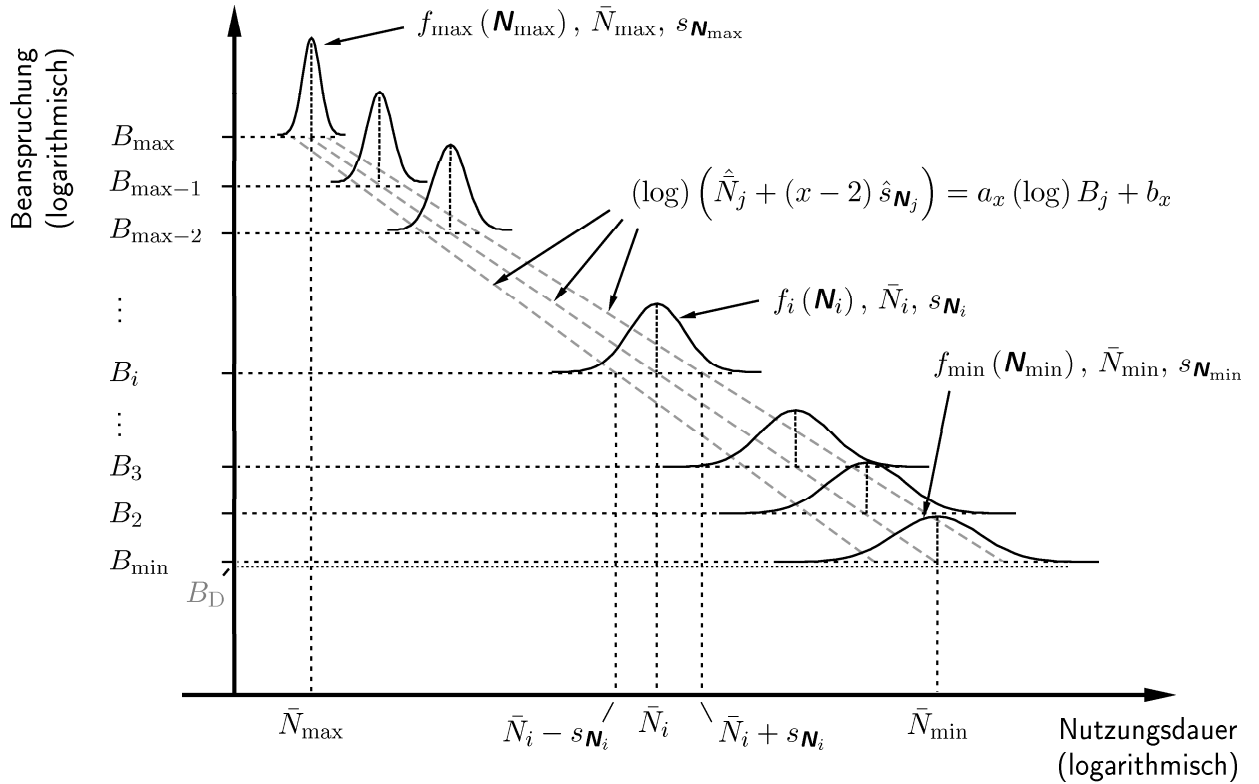


Abbildung 5.3: Notwendige Parameter der Lebensdauerkennlinie

Es folgt eine Auflistung der für das Modell notwendigen Parameter:

1. Benötigt werden die maximale und minimale Beanspruchung B_{\max} und B_{\min} . Die Beanspruchung B_{\max} stellt die maximal mögliche Beanspruchung dar, bei der die Einheit nicht nach einer minimalen Zahl an Nutzungen n_{\min} ausfällt. Die Beanspruchung B_{\min} stellt die minimal mögliche Beanspruchung B_{\min} dar, die in der Einheit auftreten kann und bei der eine endliche Nutzungsdauer existiert. Existiert eine Dauerbeanspruchung B_D , unter der die Einheit unendlich lange genutzt werden kann, so stellt die Minimalbeanspruchung B_{\min} die nächsthöhere Beanspruchung oberhalb von B_D dar.
2. Der empirische Erwartungswert \bar{N}_i (3.7) sowie die empirische Standardabweichung s_{N_i} (3.9) für die maximalen Nutzungsdauern \mathbf{N}_i der k Beanspruchungshorizonte B_i (mit $i = 1, 2, \dots, k-1, k; B_1 = B_{\min}$ und $B_k = B_{\max}$) der Versuchsreihe müssen bekannt sein. Die empirischen Erwartungswerte \bar{N}_i sowie die empirischen Erwartungswerte plus/minus der empirischen Standardabweichungen $\bar{N}_i \pm s_{N_i}$ der verschiedenen Beanspruchungsstufen B_i werden jeweils durch ein Polynom l . Ordnung der Form

$$\hat{N}_i + (x-2)\hat{s}_{N_i} = a_{x,l}B_i^l + a_{x,l-1}B_i^{l-1} + \dots + a_{x,1}B_i + b_x$$

bzw.

$$\log\left(\hat{N}_i + (x-2)\hat{s}_{N_i}\right) = a_{x,l}\log B_i^l + a_{x,l-1}\log B_i^{l-1} + \dots + a_{x,1}\log B_i + b_x, \quad (5.1)$$

mit den Parametern $a_{x,j}$ und b_x ($j = 1, 2, \dots, l$ und $x = 1, 2, 3$) verbunden. Somit können die Erwartungswerte \hat{N}_i und die Standardabweichungen \hat{s}_{N_i} für beliebige Beanspruchungsniveaus $B_{\min} \leq B_i \leq B_{\max}$ approximativ bestimmt werden.

3. Zuletzt werden die Verteilungsdichtefunktionen $f_i(\mathbf{N}_i)$ der maximalen Nutzungsdauern \mathbf{N}_i mit den zugehörigen Parametern benötigt. Diese werden entweder aus den empirischen Parametern \bar{N}_i und s_{N_i} bestimmt oder über Schätzverfahren (Abschnitt 3.3.2) approximiert. Die Verteilungsdichtefunktionen sind idealerweise vom selben Typ mit unterschiedlichen Parametern. Üblicherweise werden für Lebensdauermodelle die Lognormal- oder die Weibullverteilung (Abschnitt 3.1.2) eingesetzt, wobei Erwartungswert und Standardabweichung mit sinkender Beanspruchung zunehmen.

Eine Datenbasis in dieser Form sollte aus einer möglichst großen Zahl an Beanspruchungsniveaus und einer großen Zahl an Versuchen pro Beanspruchungsniveau bestehen. Somit kann gewährleistet werden, dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse der folgenden Rechenwege ausreichend hoch ist. Für das Lebensdauermodell gelten zusammenfassend die folgenden Annahmen:

1. Die Parameter des Modells sind das Ergebnis von statistischen Lebensdauerversuchen mit ausreichend vielen und ausreichend großen Stichproben.
2. Das Modell umfasst alle möglichen, schädigenden Beanspruchungsstufen B_i . Beanspruchungen oberhalb von B_{\max} führen zu einem quasi sofortigen Ausfall der Einheit. Beanspruchungen unterhalb von B_{\min} verursachen keine Schädigung der Einheit.
3. Die Abweichungen der approximierten Mittelwerte und Standardabweichungen nach (5.1) von den tatsächlichen Werten sind zu vernachlässigen.
4. Die Verteilungen der maximalen Nutzungsdauern \mathbf{N}_i können für alle Beanspruchungsstufen B_i ausreichend genau mit einem entsprechenden Modell der Lognormal- oder Weibullverteilung beschrieben werden.
5. Die Werte der Lage- und Streuungsparameter der entsprechenden Verteilungen nehmen mit abnehmender Beanspruchung zu.
6. Die Parameter des Lebensdauermodells bleiben für alle auf die Einheit einwirkenden Beanspruchungs-Zeit-Funktionen konstant.

5.1.2 Lebensdauerberechnung im SRCE-Konzept

Der Agent 2 berechnet online auf Basis der aktuell erfassten Beanspruchungen und des Lebensdauermodells von Agent 1 eine Zuverlässigkeitskenngröße \mathcal{Z} . Diese allgemein gefasste Zuverlässigkeitskenngröße \mathcal{Z} kann die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$

oder andere Kennwerte nach Abschnitt 3.1.3 darstellen. Die Definition der Ausfallwahrscheinlichkeit bezogen auf den Ausfallzeitpunkt \mathbf{T} lautet $F(t) = \Pr(\mathbf{T} \leq t)$ bzw.

$$F(n) = \Pr(\mathbf{N} \leq n) \quad (5.2)$$

für die Nutzungsdauer. Es ist ebenfalls möglich, die Ausfallwahrscheinlichkeit als Wahrscheinlichkeit auszudrücken, dass die Schädigung D der Einheit die maximal mögliche, kritische Schädigung D^* erreicht oder überschreitet. Unter der Annahme, dass die kritische Schädigung einer Einheit nicht deterministisch bestimmbar ist, folgt $F(D) = \Pr(D^* \leq D)$. In Abschnitt 3.2.3 konnte gezeigt werden, dass die Berechnung der aktuellen Schädigung D mit probabilistischen Methoden zu realistischeren Ergebnissen führt. Die Kenngröße D kann daher als probabilistische Größe \mathbf{D} betrachtet werden und die Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich zu

$$F(\mathbf{D}) = \Pr(\mathbf{D}^* \leq \mathbf{D}) . \quad (5.3)$$

Modelle nach (5.3) werden als *Stress-Strength-Interference* Modelle bezeichnet [Kapur u. Lamberson, 1977; Kotz u. a., 2003]. Ziel solcher Modelle ist die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Überlappung zweier Verteilungsdichtefunktionen. Diese Wahrscheinlichkeit ist gleichbedeutend mit der Wahrscheinlichkeit, dass eine Zufallsvariable einen Wert größer oder gleich dem Wert einer zweiten Zufallsvariable annimmt. Üblicherweise werden diese Modelle mit den Verteilungsdichten für die Beanspruchung B (engl. Stress) und die Beanspruchbarkeit bzw. Festigkeit B_G (engl. Strength) aufgestellt und die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Einheit wird auf Basis dieser Zufallsgrößen bestimmt (z. B. [Carter, 1986; Tang u. Zhao, 1995; Place u. a., 1999]). Dieser Ansatz betrachtet nur die Ausfallwahrscheinlichkeit für eine aktuelle Beanspruchung B_i ohne die Beanspruchungsgeschichte B_1, \dots, B_i zu berücksichtigen. Wichtige Faktoren der Beanspruchungsgeschichte wie die Reihenfolge und die Beanspruchungswechselwirkungen werden nicht oder nur berücksichtigt, wenn ihre Einflüsse auf die Verringerung der Beanspruchbarkeit B_G bekannt sind. Sind diese Einflüsse nicht bekannt, werden, wie in [Rekha u. Shyam Sunder, 1997], Zufallsgrößen zur Verringerung der Beanspruchbarkeit bei fortschreitender Beanspruchung gewählt.

Im Rahmen der Lebensdauerberechnung des SRCE-Agenten 2 entspricht die Schädigung \mathbf{D} des Modells (5.3) der Größe „Stress“ und die kritischen Schädigung \mathbf{D}^* der Größe „Strength“. Grafisch ist dies in Abbildung 5.4 verdeutlicht. Bei gegebenen Verteilungsdichten $f_{\mathbf{D}}$ und $f_{\mathbf{D}^*}$ ergibt sich die analytische Lösung von (5.3) als

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^D f_{\mathbf{D}^*}(D^*) f_{\mathbf{D}}(D) \, dD^* dD \quad (5.4)$$

bzw. als Faltungsintegral zu

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{\mathbf{D}}(D) F_{\mathbf{D}^*}(D) \, dD . \quad (5.5)$$

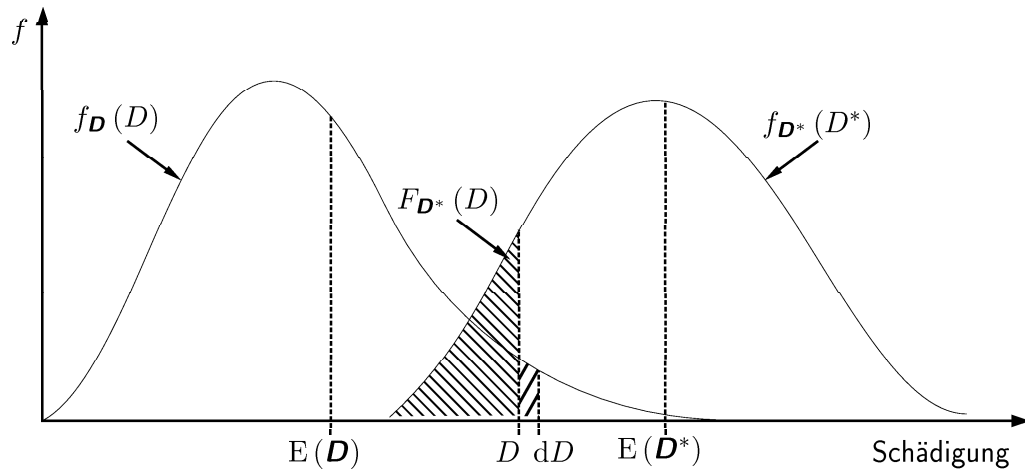


Abbildung 5.4: Stress-Strength-Interferenzmodell

Ist die gemeinsame Verteilungsdichte $f(\mathbf{D}, \mathbf{D}^*)$ beider Zufallsgrößen bekannt, ergibt sich

$$\int_{\mathbf{Z} \leq 0} f(\mathbf{D}, \mathbf{D}^*) d\mathbf{D} d\mathbf{D}^*. \quad (5.6)$$

Hierbei ist

$$\mathbf{Z} = g(\mathbf{D}, \mathbf{D}^*) = \mathbf{D}^* - \mathbf{D} \quad (5.7)$$

die Grenzzustandsfunktion und es gilt:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} > 0 &\Rightarrow \text{Einheit funktionsfähig und} \\ \mathbf{Z} \leq 0 &\Rightarrow \text{Einheit ausgefallen.} \end{aligned}$$

Die analytische Lösung der Gleichungen (5.4), (5.5) und (5.6) ist nur für bestimmte, einfache Verteilungsdichten $f_{\mathbf{D}}$ und $f_{\mathbf{D}^*}$ möglich. Für komplexere Verteilungsdichten existieren verschiedene Näherungslösungen wie die Zuverlässigkeitstheorie Erster Ordnung (First-Order Reliability Method, FORM) oder die Zuverlässigkeitstheorie Zweiter Ordnung (Second-Order Reliability Method, SORM) sowie Simulationstechniken wie die Monte-Carlo Simulation. Eine Übersicht zur Lösung der Gleichungen (5.4), (5.5) und (5.6) geben [Kotz u. a., 2003]. Ansätze zur Schätzung der Zuverlässigkeitseigenschaften mit dem Ansatz des Interference-Modells der aktuellen Schädigung \mathbf{D} und der kritischen Schädigung \mathbf{D}^* nach (5.3) werden in [Ayyub u. a., 2002] erwähnt.

Die Aufgabe des Agenten 2 besteht somit in einer Transformation der aktuellen und vergangenen Beanspruchungen in eine Kenngröße für die aktuelle Schädigung. Dies geschieht unter Einsatz einer stochastischen Schadensakkumulationshypothese und eines Lebensdauermodells. Da dies online erfolgt, wird für jede Nutzung $n_i = 1$ das Schädigungsinkrement d_i berechnet und gemäß der Schadensakkumulationshypothese aufsummiert. Die Berechnung des Schädigungsinkrements beruht

bei den meisten Ansätzen auf Informationen aus dem Lebensdauermodell. Werden diese als stochastisch angenommen, folgt, dass das Schädigungsinkrement eine stochastische Größe \mathbf{d}_i mit den Momenten $E(\mathbf{d}_i)$ und $V(\mathbf{d}_i)$ darstellt. Die statistischen Momente der akkumulierten Schädigung ergeben sich nach (3.5) und (3.6), wobei die Verteilungsdichte gemäß dem zentralen Grenzwertsatz mit zunehmender Zahl i der Nutzungen eine Normalverteilung annimmt. Die statistischen Momente $E(\mathbf{D}^*)$ und $V(\mathbf{D}^*)$ der kritischen Schädigung \mathbf{D}^* ergeben sich aus empirischen Untersuchungen. Die Lösung der Gleichung (5.5) muss im Rahmen des SRCE-Konzepts online erfolgen, wodurch nur numerische Näherungsverfahren in Frage kommen. Simulationen als Lösungsansätze scheiden aus, da der Zeitaufwand hierbei zu groß ist. Da die Verfahren der Zuverlässigkeitstheorie Erster und Zweiter Ordnung keine Informationen über die Art der Verteilungsdichte der Größen \mathbf{D} und \mathbf{D}^* benötigen, ist die Bestimmung der Momente der jeweiligen Größen ausreichend zur Schätzung der Zuverlässigkeitskenngröße.

Ziel der numerischen Verfahren ist die Bestimmung der statistischen Momente der Grenzzustandsfunktion \mathbf{Z} (5.7). Bei gegebenen Erwartungswerten der Basisgrößen \mathbf{D} und \mathbf{D}^* wird die Funktion (5.7) als Taylorreihe an den Entwicklungspunkten $E(\mathbf{D})$ und $E(\mathbf{D}^*)$ dargestellt, wobei die Taylorreihe nach dem ersten (FORM) bzw. zweiten (SORM) Taylorpolynom abgebrochen wird. Die statistischen Momente der Grenzzustandsfunktion \mathbf{Z} nach dem Verfahren FORM ergeben sich somit zu

$$E(\mathbf{Z}) \approx g(E(\mathbf{D}), E(\mathbf{D}^*))$$

und

$$V(\mathbf{Z}) \approx \left(\frac{\partial Z}{\partial \mathbf{D}} \right)^2 \bigg|_{E(\mathbf{D})} V(\mathbf{D}) + \left(\frac{\partial Z}{\partial \mathbf{D}^*} \right)^2 \bigg|_{E(\mathbf{D}^*)} V(\mathbf{D}^*)$$

für statistisch unabhängige Variablen \mathbf{D} und \mathbf{D}^* . Der Zuverlässigkeitsindex

$$\beta = \frac{E(\mathbf{Z})}{\sigma_{\mathbf{Z}}},$$

auch *Basler/Cornell-Index* genannt, kann somit als Maß der Zuverlässigkeit und somit als Zuverlässigkeitskenngröße \mathcal{Z} genutzt werden. Für den Fall, dass die Basisgrößen \mathbf{D} und \mathbf{D}^* normalverteilt sind, gilt die Beziehung

$$F = 1 - \Phi(\beta) \tag{5.8}$$

für die Ausfallwahrscheinlichkeit.

Für nicht normalverteilte, statistisch unabhängige Basisgrößen kann die Ausfallwahrscheinlichkeit nach (5.8) geschätzt werden, wenn die Basisgrößen nach der *Advanced Second-Moment Method* transformiert werden. In einem iterativen Verfahren wird hierbei für jede Basisgröße \mathbf{X}_i eine äquivalente Normalverteilung $F_{\mathbf{X}_i}^N$ an einem β -Punkt $x_{\beta_i} \in g = 0$ bestimmt [Rackwitz, 1977]. Diese äquivalente Normalverteilung existiert, wenn die Bedingungen

$$F_{\mathbf{X}_i}^N(x_{\beta_i}) = F_{\mathbf{X}_i}(x_i)$$

und

$$f_{\mathbf{X}_i}^N(x_{\beta_i}) = f_{\mathbf{X}_i}(x_i)$$

erfüllt sind. Aus der Lösung der Grenzzustandsfunktion für die Parameter dieser äquivalenten Normalverteilung ergibt sich ein Zuverlässigkeitsindex β . Dieser Zuverlässigkeitsindex ermöglicht die Berechnung neuer β -Punkte. Der Prozess wird solange iterativ wiederholt, bis die Größe β konvergiert. Der Algorithmus der Iteration nach *Rackwitz-Fiessler* ist in Abbildung 5.5 abgebildet.

Das Ergebnis dieses iterativen Prozesses ist ein Zuverlässigkeitsindex, der nach (5.8) zur Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit genutzt werden kann. Dieser Zuverlässigkeitsindex wird *Hasofer-Lind-Index* β_{HL} genannt. Geometrisch interpretiert, repräsentiert er den kürzesten Abstand vom Ursprung des Koordinatensystems der standardnormal transformierten Größen

$$\dot{\mathbf{X}}_i = (\mathbf{X}_i - \mu_{\mathbf{X}_i}) / \sigma_{\mathbf{X}_i}$$

zu einer Ausfalloberfläche, definiert durch die Grenzzustandsfunktion

$$\dot{\mathbf{Z}} = g(\dot{\mathbf{D}}, \dot{\mathbf{D}}^*) = \frac{\sigma_{\mathbf{D}}(\mathbf{D}^* - \mu_{\mathbf{D}^*}) - \sigma_{\mathbf{D}^*}(\mathbf{D} - \mu_{\mathbf{D}})}{\sigma_{\mathbf{D}^*}\sigma_{\mathbf{D}}}$$

der transformierten Größen (siehe Abbildung 5.6).

Die akkumulierte Schädigung \mathbf{D}_i nach der i -ten Nutzung ist, bedingt durch die zu Grunde liegende Akkumulationshypothese, direkt abhängig von der Nutzungsgeschichte und damit von der Beanspruchungsgeschichte der Einheit. Die kritische Schädigung \mathbf{D}_i^* während der i -ten Nutzung ergibt sich aus empirischen Zusammenhängen aus dem Lebensdauermodell. Der Ausfall einer Einheit tritt gemäß (5.2) beim Erreichen einer Nutzungsdauer $n \geq \mathbf{N}$ ein. Der gleiche Zustand der Einheit wird erreicht, wenn die akkumulierte Schädigung \mathbf{D}_i die kritische Schädigung \mathbf{D}_i^* erreicht (5.3). Die stochastischen Eigenschaften, die den Zustand als Zufallsgröße beschreiben, können somit als identisch angesehen werden. Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die Beziehung

$$\text{VK}(\mathbf{D}_i^*) = \text{VK}(\mathbf{N}_i) \quad (5.9)$$

gilt. Unter der Annahme eines konstanten Erwartungswertes

$$\text{E}(\mathbf{D}_i^*) = \text{E}(\mathbf{D}^*) = \text{konst.} \quad (5.10)$$

ist die relative Standardabweichung der Verteilung von \mathbf{D}_i^* während der i -ten Nutzung direkt abhängig von der relativen Standardabweichung der maximalen Nutzungsdauer \mathbf{N}_i . Nach dem Lebensdauermodell aus Abschnitt 5.2.1 und (5.1) lassen sich \bar{N}_i und $s_{\mathbf{N}_i}$ annähernd als Funktion der aktuellen Beanspruchung B_i darstellen. Nach (3.10) ist somit auch der Variationskoeffizient als Funktion von B_i berechenbar und die Standardabweichung der kritischen Schädigung \mathbf{D}_i^* bildet ein Maß für die aktuelle Beanspruchung B_i . Die auf der Basis von (5.3) berechnete Größe stellt somit eine Zuverlässigkeitskenngröße \mathcal{Z} dar, die direkt von der aktuellen Beanspruchung B_i und der Beanspruchungsgeschichte B_1, \dots, B_i und somit direkt von der aktuellen und der vergangenen Nutzungsweise abhängt.

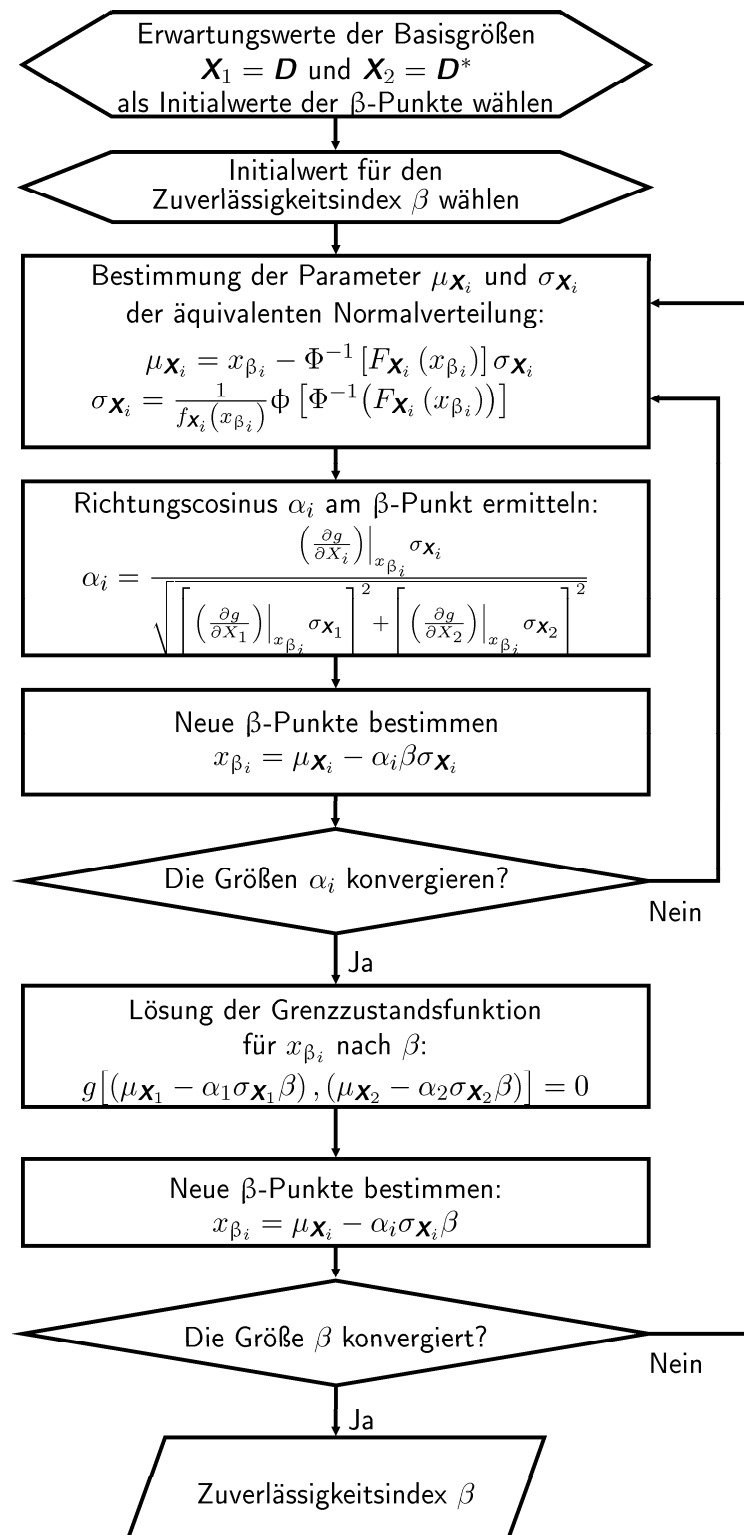


Abbildung 5.5: Iterativer Algorithmus der Advanced Second-Moment Method

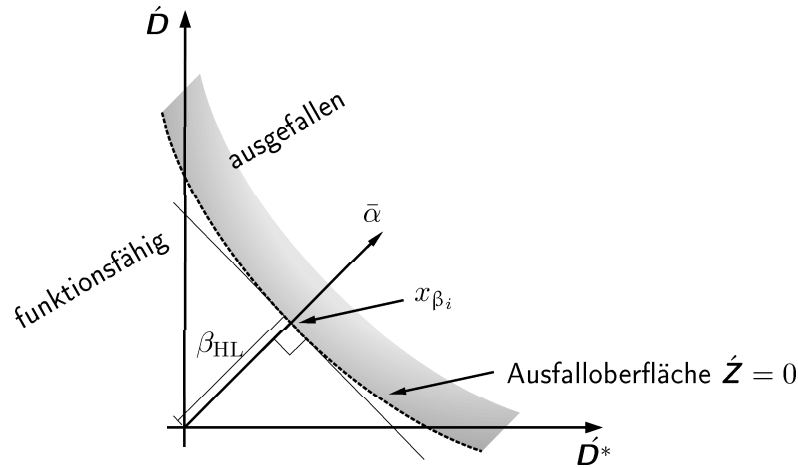


Abbildung 5.6: Geometrische Interpretation des Hasofer-Lind-Zuverlässigkeitsindex

5.1.3 Nutzungsdauer- und Zuverlässigkeitskenngrößenoptimierung

Um die für den Anlagen- oder Maschinenbetreiber entscheidende Frage nach dem Erreichen eines zuverlässigkeitstechnisch unvertretbaren Zustands einer Einheit beantworten zu können, müssen zum aktuellen Nutzungszeitpunkt n_i auf Basis der bisherigen Modelle Prognosen erstellt werden. Diese Prognosen können entweder auf der Grundlage der bisherigen Werteentwicklung der Zuverlässigkeitskenngröße, des akkumulierten Schadens [Maisch u. a., 2005] oder unter der Annahme eines bestimmten zukünftigen Beanspruchungsverlaufs erstellt werden. Zur Unterstützung einer ausfallvermeidenden Betriebsführung empfiehlt sich letzterer Ansatz, da dieser die Prognosen von zukünftig evtl. abweichenden, definierten und quantifizierten Beanspruchungsverläufen berücksichtigt. Somit ist ein direkter Zusammenhang zwischen der geplanten Betriebsweise, dargestellt durch einen bestimmten Beanspruchungs-Zeit-Verlauf, und der prognostizierten maximalen Nutzungsdauer bis zum Erreichen eines zuverlässigkeitstechnisch unvertretbaren Zustands möglich. Der Agent 3 des SRCE-Konzept übernimmt genau diese Aufgabe mit den nachfolgenden Schritten.

Prognosen

Um eine Prognose, basierend auf unterschiedlichen Annahmen für den zukünftigen Beanspruchungs-Zeit-Verlauf $\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k$, mit $j, k > i$ und $k > j$ durchzuführen, können folgende Fälle unterschieden werden:

1. Die Annahme berücksichtigt eine konstante Beanspruchung

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = \text{konst.},$$

für den zukünftigen Beanspruchungs-Zeit-Verlauf. Hierbei gilt $j = i + 1$. Die Beanspruchung \hat{B}_k beschreibt die Beanspruchung beim Erreichen von Z_{krit} . Dieser Annahmefall ist sinnvoll bei Beanspruchungen, die über einen längeren Nutzungszeitraum konstant sind oder zur Prognose von *best-* oder *worst-case* Szenarien.

2. Für die Annahme, dass die zukünftige Beanspruchungs-Zeit-Funktion einem periodischen Verlauf folgt, gilt

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = l(b_1, \dots, b_n), \text{ mit } l \in \mathbb{N}, b_i \in [B_{\min}, B_{\max}]$$

mit $i = 1, \dots, n$.

3. Die Annahme eines weiteren Beanspruchungs-Zeit-Verlaufs basiert auf den letzten q detektierten Beanspruchungen. Dies kann eine Wiederholung der letzten q Beanspruchungen sein,

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = B_{i-q+1}, \dots, B_i$$

mit $q = k - j$, oder eine Prognose der zukünftigen $k - j + 1$ Beanspruchungen

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = g_P(B_{i-q+1}, \dots, B_i),$$

basierend auf einer Prognosefunktion bzw. einem Prognosemodell g_P und den q letzten Beanspruchungsniveaus.

4. Die Annahme berücksichtigt eine annähernd beschreibbare Streuung der Beanspruchungen des Beanspruchungs-Zeit-Verlaufs nach Fall 1 und 2. Die Prognosen erfolgen in diesem Fall für unterschiedliche Quantile der Beanspruchung \mathbf{B} . Unter der Annahme $\mathbf{B} \sim N(\bar{B}, s_{\mathbf{B}})$ kann

$$\begin{aligned} &\text{mit } \hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = \bar{B} + 3s_{\mathbf{B}} \text{ ein Anteil von } 99,85\%, \\ &\text{mit } \hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = \bar{B} + 2s_{\mathbf{B}} \text{ ein Anteil von } 97,75\% \text{ und} \\ &\text{mit } \hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = \bar{B} + 1s_{\mathbf{B}} \text{ ein Anteil von } 84\% \end{aligned}$$

der Beanspruchungen erfasst werden.

Die Prognose der maximalen Nutzungsdauer erfolgt für alle vier Fälle nach dem gleichen Schema. Zunächst müssen die ersten beiden statistischen Momente E und V des Schädigungsinkrements \mathbf{d}_P für die prognostizierte Beanspruchung (Fall 1) bzw. der akkumulierten Schädigung $\mathbf{D}_{k,P}$ für die prognostizierte Beanspruchungsfolge $\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k$ ermittelt werden. Die Momente der kritischen Schädigung $\mathbf{D}_{k,P}^*$ ergeben sich nach (5.1) im Zusammenhang mit (5.9) und (5.10) aus der Beanspruchung \hat{B}_k . Anschließend wird eine Nutzungsdauer n_{eq}^Z unter Annahme eines Beanspruchungs-Zeit-Verlaufs $\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k$ von Beginn der Nutzung an errechnet. Die Zuverlässigkeitskenngröße dieser Nutzungsdauer ist äquivalent zur aktuellen Zuverlässigkeitskenngröße \mathcal{Z}_i . Die Berechnung basiert auf dem iterativen Verfahren der Bisektion zur Auffindung der äquivalenten Nutzungsdauer n_{eq}^Z . Hierbei wird ein Faktor a ermittelt, welcher nach der *Advanced Second-Moment Method* (siehe Abbildung 5.5) und (5.8) für

$$\mathbf{D} = a \mathbf{d}_P \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{D} = a k \mathbf{D}_{k,P}$$

eine Zuverlässigkeitskenngröße entsprechend \mathcal{Z}_i ergibt. Hierbei sind die Annahmen zu berücksichtigen, dass die Schädigungssumme nach (3.23) bestimmt wird und dass

in den Fällen 1 bis 3 nur komplette Beanspruchungsverläufe der Länge k berücksichtigt werden. Die Differenz

$$\Delta n_P = N_P - n_{eq}^Z \quad (5.11)$$

zwischen der maximalen Nutzungsdauer N_P unter dem alleinigen Beanspruchungs-Zeit-Verlauf $\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k$ und der äquivalenten Nutzungsdauer n_{eq}^Z ergibt die Zahl der Nutzungen, die bis zum Erreichen einer kritischen Zuverlässigkeitskenngröße Z_{krit} bei entsprechend angenommener zukünftiger Beanspruchung verbleiben. Die Bestimmung der Größe N_P erfolgt nach dem selben iterativen Verfahren wie oben beschrieben, wobei in diesem Fall das Erreichen der kritischen Zuverlässigkeitskenngröße Z_{krit} als Abbruchkriterium des Verfahrens gilt. Die Zusammenhänge der einzelnen Nutzungsdauern sind grafisch in Abbildung 5.7 wiedergegeben.

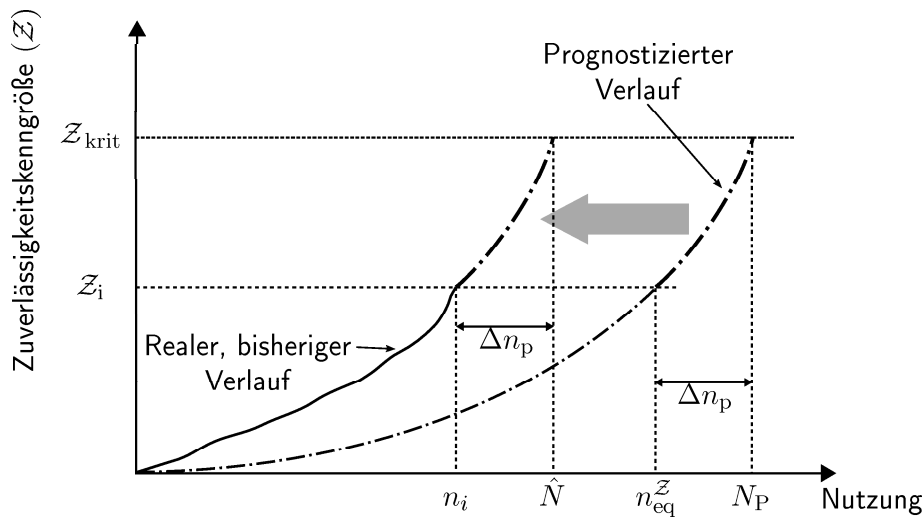


Abbildung 5.7: Bestimmung der prognostizierten Nutzungsdauer

Die zu erwartende Zuverlässigkeitskenngröße $Z_{N_{soll}}$ kann beim Erreichen der vorgesehenen maximalen Nutzungsdauer N_{soll} analog zu dem oben beschriebenen Verfahren ermittelt werden. In diesem Fall wird eine Zuverlässigkeitskenngröße Z_{eq}^n unter Annahme des zu prognostizierenden Beanspruchungsverlaufs $\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k$ bestimmt. Die Zahl der Nutzungen beim Erreichen dieser Zuverlässigkeitskenngröße ist äquivalent zur aktuellen Zahl der Nutzung n_i . Anschließend wird die Zuverlässigkeitskenngröße $Z_{P, N_{soll}}$ beim Erreichen der vorgegebenen maximalen Nutzungsdauer N_{soll} unter dem angenommenen Beanspruchungsverlauf errechnet. Erneut wird hierbei die *Advanced Second-Moment Method* eingesetzt. Die zu erwartende Zuverlässigkeitskenngröße ergibt sich dann analog zu (5.11) als

$$Z_{N_{soll}} = Z_i + \Delta Z_P = Z_i + Z_{P, N_{soll}} - Z_{eq}^n.$$

Eine grafische Übersicht der Vorgehensweise ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Begrenzung der Beanspruchung und Regelung der Nutzungsdauer

Zur Einhaltung der operativen Ziele müssen die Betriebsbedingungen gegebenenfalls derart geändert werden, dass eine gewünschte Beeinflussung des probabilistischen

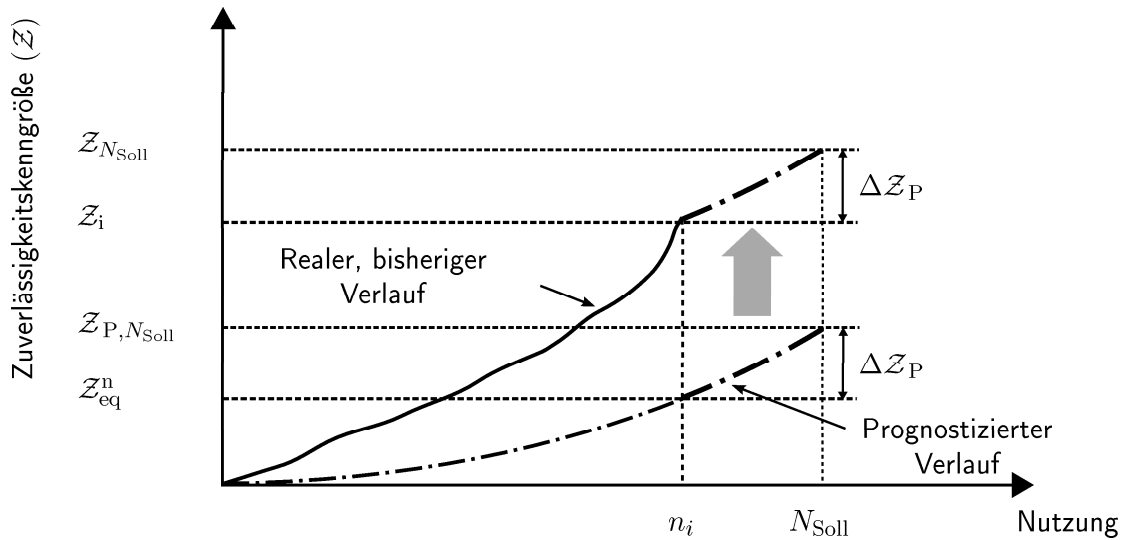


Abbildung 5.8: Bestimmung der prognostizierten Zuverlässigkeitskenngröße

Ausfalls erreicht wird. Die Änderung der Betriebsbedingungen erfolgt entweder über eine Limitierung der Beanspruchung oder über die Vorgabe bestimmter Betriebsweisen M , ausgedrückt durch definierte Beanspruchungs-Zeit-Verläufe. Im letzteren Fall gilt zu berücksichtigen, dass die erwarteten Beanspruchungs-Zeit-Verläufe nicht den real auftretenden Verläufen entsprechen müssen. Gegebenenfalls muss hier wieder durch eine Begrenzung der Beanspruchung eine Korrektur erfolgen, um die gegebenen Ziele zu erreichen.

Mit dem iterativen Verfahren der Bisektion wird eine maximale Beanspruchung B_L innerhalb eines Beanspruchungsbereichs $[B_{\min}, \dots, B_{\max}]$ der möglichen Beanspruchungen ermittelt, die bei konstantem Beanspruchungs-Zeit-Verlauf $B_{i+1}, \dots, B_k = B_L$ mit $k > 1$ ab der Nutzung n_{i+1} eine maximale Nutzungsdauer $\hat{N}_L \geq N_{\text{soll}}$ unter Einhaltung einer Zuverlässigkeitskenngröße $Z_k \leq Z_{\text{krit}}$ (für Zuverlässigkeitskenngrößen, die sich mit positiv wachsenden Werten verschlechtern, wie z. B. Ausfallraten oder Ausfallwahrscheinlichkeiten) ermöglicht. Hierzu werden für jeden Kandidaten B_L die Größen E und V des Schädigungsinkrements \mathbf{d}_L sowie der zugehörigen kritischen Schädigung \mathbf{D}_L^* berechnet. Analog der Vorgehensweise zur Bestimmung der äquivalenten Nutzungsdauer n_{eq}^Z sowie der maximalen Nutzungsdauer N_P unter Annahme eines Beanspruchungs-Zeit-Verlaufs $\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k$ werden eine äquivalente Nutzungsdauer n_{eq}^Z sowie eine maximale Nutzungsdauer N_P unter Berücksichtigung der Beanspruchung B_L ermittelt. Die maximale Nutzungsdauer unter Beanspruchung B_L ab n_i ergibt sich mit (5.11) als

$$\hat{N}_L = n_i + \Delta n_P.$$

Für die Beanspruchung $B_{L+} = B_L + 1$ wird entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise die maximale Nutzungsdauer \hat{N}_{L+} berechnet. Anschließend wird der

Wert von B_L solange iterativ verändert, bis die Bedingungen

$$\hat{N}_L \leq N_{\text{Soll}} \quad \wedge \quad \hat{N}_{L+} > N_{\text{Soll}}$$

erfüllt sind. Der hierbei bestimmte Wert für B_L bildet somit die maximal mögliche Beanspruchung zur Einhaltung der Zielvorgaben.

Solange die Bedingung

$$\hat{N} = n_i + \Delta n_P < N_{\text{soll}},$$

die besagt, dass die prognostizierte maximale Nutzungsdauer kleiner als die gewünschte maximale Nutzungsdauer ist, nicht erfüllt ist, erfolgt eine Begrenzung der maximalen Beanspruchung entsprechend dem oben geschilderten Verfahren.

Daneben ist es ebenfalls möglich, die Beanspruchung entsprechend einer vorgegebenen Trajektorie der Zuverlässigkeitskenngröße zu limitieren. Dies ist in Abbildung 5.9 erläutert. Hier ist der bisherige Verlauf der Zuverlässigkeitskenngröße bis zum Nutzungszeitpunkt n_i dargestellt. Als Extremfall ist eine weitere Trajektorie der Zuverlässigkeitskenngröße ab n_{i+1} entsprechend der gestrichelten Kurve, die den prognostizierten Extremverlauf darstellt, anzunehmen. Dies entspricht einem Grenzwert \mathcal{Z}_L der weiteren Zuverlässigkeitskenngröße, der eingehalten werden muss, um die Bedingungen $N \geq N_{\text{Soll}}$ und $\mathcal{Z}_N \leq \mathcal{Z}_{\text{krit}}$ zu erfüllen. Der Verlauf entspricht einer Funktion der Form

$$\mathcal{Z}_{k,L} = \frac{(\mathcal{Z}_{\text{krit}} - \mathcal{Z}_i) \left(1 - \frac{1}{k^2}\right)}{1 - \frac{1}{\Delta n^2}} + \mathcal{Z}_i, \quad (5.12)$$

mit $k = i + 1, i + 2, \dots, \Delta n$ und $\Delta n = N_{\text{Soll}} - n_i$. Die maximal zulässigen Beanspruchungen zur Einhaltung dieser Grenztrajektorie der Zuverlässigkeitskenngröße für jeden Nutzungszeitpunkt n_k können mit einer modellbasierten prädiktiven Regelung bestimmt werden. Hierbei werden, basierend auf dem Lebensdauer-, dem Schadensakkumulationsmodell und dem Modell zur Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngröße (siehe die Abschnitte 3.2.3, 5.1.1 und 5.1.2), zukünftige Zuverlässigkeitskenngrößen $\hat{\mathcal{Z}}_{i+1}, \dots, \hat{\mathcal{Z}}_k$ mit $k = i + 1, i + 2, \dots, \Delta n$ entsprechend den zukünftigen Beanspruchungen $\hat{B}_{i+1}, \dots, \hat{B}_k$ mit $k = i + 1, i + 2, \dots, \Delta n_u - 1$ bzw. den zukünftigen Beanspruchungsänderungen ΔB für einen begrenzten Kontrollhorizont $\Delta n_u < \Delta n$ berechnet. Die Werte $\hat{B}_{i+1}, \dots, \hat{B}_k$ werden mit einem Optimierungsverfahren so bestimmt, dass eine gegebene Verlustfunktion, wie beispielsweise

$$V = \sum_{j=1}^{\Delta n} \left[\mathcal{Z}_{i+j,L} - \hat{\mathcal{Z}}_{i+j|i} \right]^2 + \sum_{j=1}^{\Delta n_u} \gamma [\Delta B_{i+j-1}]^2,$$

minimiert wird. Der Koeffizient γ repräsentiert einen Gewichtungsfaktor. Das erste Element \hat{B}_{i+1} definiert die maximale Grenzbeanspruchung B_L . Nach einer weiteren Nutzung n_{i+1} wird die entsprechend der tatsächlich auftretenden Beanspruchung B_{i+1} resultierende Zuverlässigkeitskenngröße \mathcal{Z}_{i+1} dem oben erwähnten Optimierungsalgorithmus zugeführt und erneut eine prognostizierte Beanspruchungsfolge

$\hat{B}_{i+2}, \dots, \hat{B}_k$, $k = i + 2, i + 3, \dots, \Delta n_u - 1$ bestimmt. Durch den so geschlossenen zuverlässigkeitstechnischen Regelkreis wird gewährleistet, dass die maximalen Grenzbeanspruchungen zur Einhaltung der Trajektorie nach (5.12) bei Überbeanspruchungen exakt bestimmt werden. Schematisch ist dieser Sachverhalt für $\mathcal{Z} = F$ in Abbildung 5.10 dargestellt.

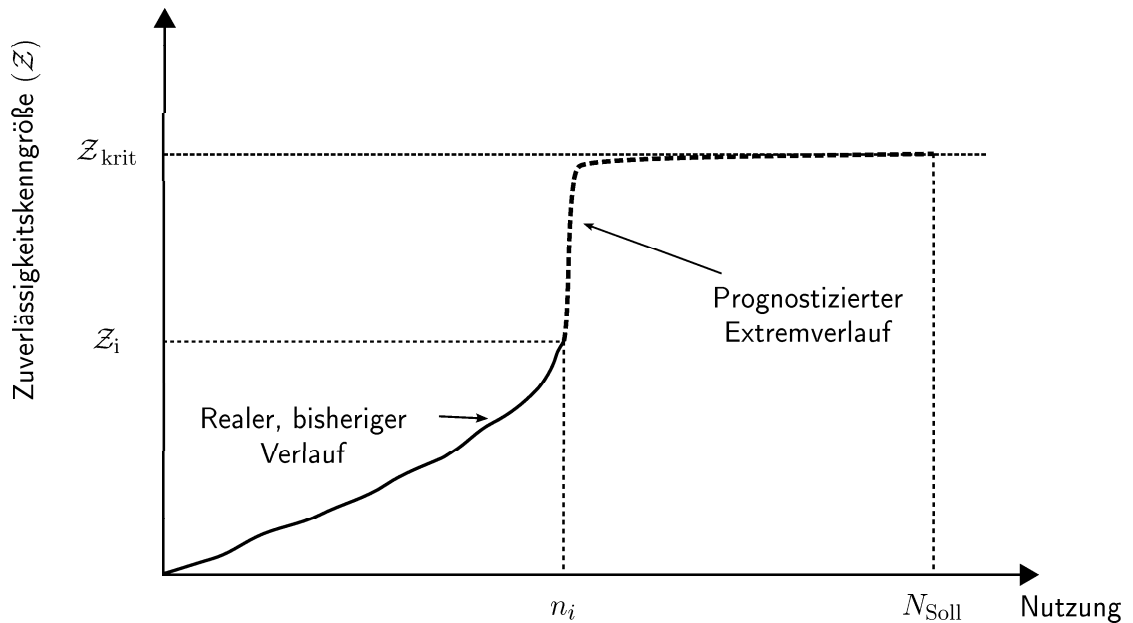


Abbildung 5.9: Extremtrajektorie der weiteren Zuverlässigkeitskenngröße

Ist die gewünschte Trajektorie der Zuverlässigkeitskenngröße bekannt (beispielsweise aus Simulationen) und können die Beanspruchungen des Systems beliebig variiert werden, so kann die oben beschriebene modellbasierte prädiktive Regelung dazu genutzt werden, die Beanspruchungen bzw. Betriebsweisen des Systems direkt zu ändern. Hierzu wird das erste Element der berechneten Beanspruchungsfolge $\hat{B}_{i+1}, \dots, \hat{B}_k$ nicht als maximale Grenzbeanspruchung genutzt, sondern über eine Relation zu bestimmten Betriebsweisen M dem System direkt zugeführt. Üblicherweise

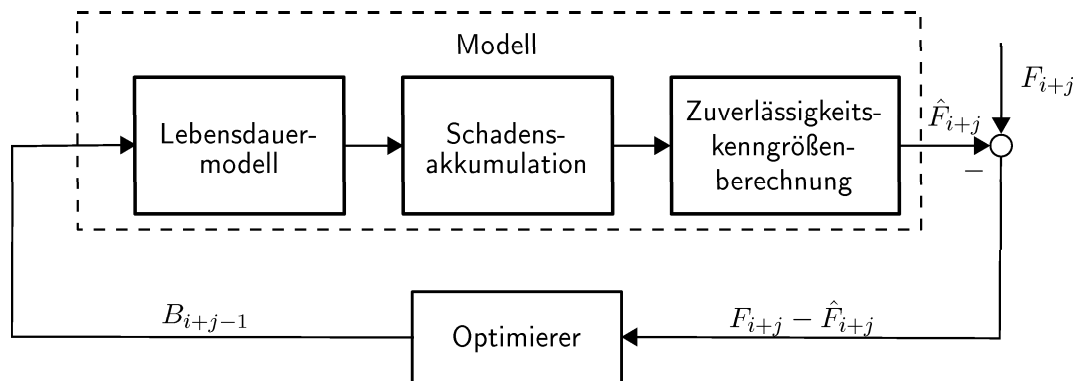


Abbildung 5.10: Regelkreis der prädiktiven modellbasierten Regelung

werden nur bestimmte Betriebsweisen mit bestimmten zugehörigen Beanspruchungsfolgen möglich sein, so dass sich ein Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen ergibt. Das eingesetzte Verfahren ist in jedem Fall iterativ und benötigt einen hohen Rechenaufwand. Möglichkeiten für in Frage kommende Optimierungsverfahren sind Evolutionäre Algorithmen, der Bergsteigeralgorithmus, der Sintflutalgorithmus sowie weitere Verfahren und Algorithmen, wie in der Fachliteratur ([Alt, 2002], [Pardalos u. Romeijn, 2002]) beschrieben.

Der Ansatz zur prädiktiven modellbasierten Regelung des Ausfallverhaltens kann innerhalb der vorliegenden Arbeit nur angerissen werden. Weitere Untersuchungen bzgl. der Umsetzung eines solchen Regelungskonzepts und eines Vergleichs mit der Begrenzung der Beanspruchungen durch Maximalwerte, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, sind ausstehend.

5.2 Numerische Simulation

Im folgenden Abschnitt wird die Wirkungsweise des SRCE-Konzepts an Hand der Ergebnisse einer numerischen Simulation eines theoretischen Beispiels erläutert. Die Simulation erfolgte mit der mathematischen Software MATLAB®. Für das Lebensdauermodell und die Lebensdauerberechnungen wurden die in den folgenden Abschnitten erwähnten Daten genutzt und die aufgeführten Annahmen getroffen. Die Simulation wurde für sechs verschiedene vorgegebene Beanspruchungs-Zeit-Verläufe durchgeführt. Daneben besteht die Möglichkeit, einen Beanspruchungsverlauf online während der Simulation einzugeben. Alle Verläufe können durch ein dauerhaftes Driftverhalten oder durch transiente Überbeanspruchungen modifiziert werden. Die Wahrscheinlichkeit hierfür kann als feststehende Konstante oder als mit der Nutzung steigender Wert gewählt werden. Die Höhe der Modifikationen sind absolute bzw. relative Konstanten. Die Prognosen erfolgen für sieben unterschiedliche Annahmen der zukünftigen Beanspruchungsverläufe. Alle Simulationen wurden solange durchgeführt, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium in Form einer kritischen Zuverlässigkeitskenngröße Z_{krit} oder einer vorgegebenen Nutzungsdauer N_{Soll} erreicht wurde.

5.2.1 Lebensdauermodell

Da eine Datenbasis zur Erstellung eines Lebensdauermodells nach 5.1.1 im Rahmen dieser Promotion nicht zur Verfügung stand und keine eigenen Versuche zur Erstellung einer entsprechenden Datenbasis erfolgen konnten, wird hier auf das Datenmaterial von [Shimokawa u. Hamaguchi, 1987] zurückgegriffen. Hierbei wurden Prüflinge aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK), bestehend aus einem 8-bindigen Atlas/Epoxyd Laminat, untersucht. Der Werkstoff CFK wird zunehmend in der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie eingesetzt, wo er die bisher üblichen Aluminiumlegierungen ersetzt. Die Prüflinge wurden mit einem Rundloch vorgekerbt, da Bohrungen dieser Art bei der Montage von Strukturen aus CFK üblich sind. Die Maße der Prüflinge betrugen 120 mm mal 30 mm. Die mittlere Stärke der Proben betrug $\bar{h} = 2,01$ mm, bei einem Variationskoeffizient von $VK(h) = 1,7\%$.

Die Lebensdauerprüfung erfolgte für die Schadensform der Materialermüdung bei mechanischen, schwingenden Belastungen. Die Prüflinge wurden an vier Punkten fixiert und mit einer Wechselbiegung mit konstanter Amplitude belastet. Die Belastungen erfolgten mit einer konstanten Frequenz von $\nu = 30$ Hz, einer Temperatur von $\theta = 22$ - 24 °C und einer relativen Feuchte von $RH = 50$ - 55 %. Demnach kann die vereinfachte Form der Schädigungsfunktion nach (3.22) eingesetzt werden. Die Beanspruchung wurde rechnerisch mit der Gleichung

$$B = 6L/wh^2$$

ermittelt. Die Belastung L entspricht dem Biegemoment, w bezeichnet die Netzweite des Prüflings und h die Materialstärke.

Es wurden fünf Beanspruchungsniveaus B_1, \dots, B_5 mit jeweils 25 Stichproben untersucht. Die Ergebnisse der Versuche sind in Abbildung 5.11 sowohl im linearen als auch im doppellogarithmischen Maßstab wiedergegeben.

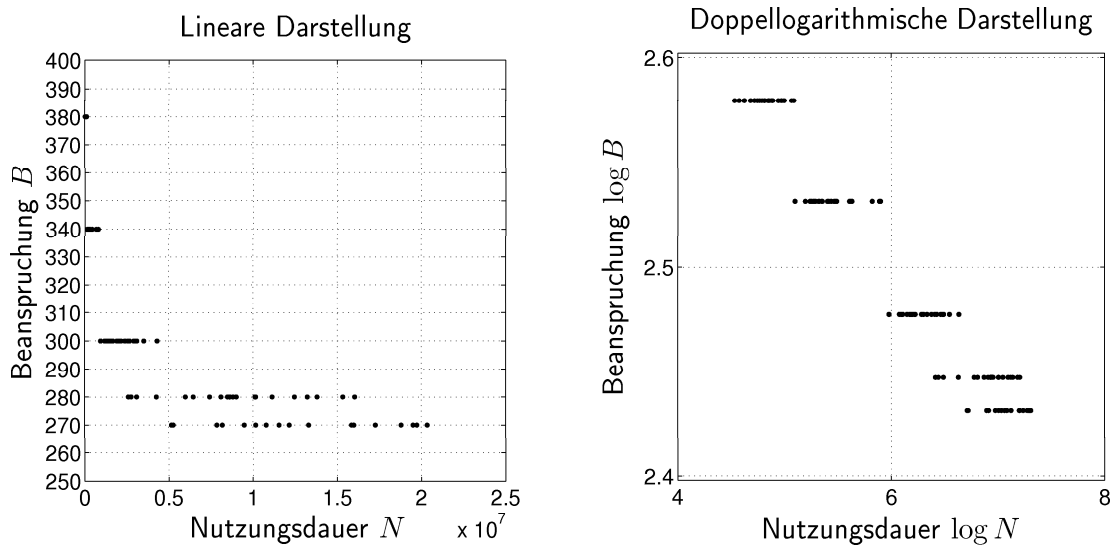


Abbildung 5.11: Lebensdauermodell nach [Shimokawa u. Hamaguchi, 1987]

In [Shimokawa u. Hamaguchi, 1987] konnte gezeigt werden, dass die Verteilung der Lebensdauern \mathbf{N} dem Modell einer Lognormalverteilung

$$\mathbf{N}_i \sim \text{LN}(\mu_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}, \sigma_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}) \quad (5.13)$$

entsprechen. Die Parameter $\mu_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}$ und $\sigma_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}$ der Verteilungen für die einzelnen Beanspruchungsniveaus sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Sie wurden auf Grund der ermittelten Lebensdauern in [Shimokawa u. Hamaguchi, 1987] bestimmt. Es sei erwähnt, dass die hier ermittelten Parameter von denen in [Shimokawa u. Hamaguchi, 1987] abweichen. Dies liegt zum einen daran, dass Shimokawa und Hamaguchi bei der Schätzung der Verteilungsparameter den dekadischen und nicht den natürlichen Logarithmus zu Grunde legen, wie es allgemein bei der Lognormalverteilung üblich ist (vergleiche [DIN 55350-22, 1987]). Zum anderen liegt es daran, dass, im Gegensatz zu Shimokawa und Hamaguchi, Prüflinge die während der Versuche nicht ausgefallen sind, bei der Bestimmung der Parameter der Lebensdauerverteilung nicht berücksichtigt wurden.

Tabelle 5.1: *Parameter der Lognormalverteilungen von N_i*

Index	Beanspruchungs- niveau	Beanspruchungs- höhe (MPa)	$\mu_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}$	$\sigma_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}$
1	B_1	270	16,3001	0,4385
2	B_2	280	15,8395	0,4610
3	B_3	300	14,4260	0,4070
4	B_4	340	12,5262	0,4815
5	B_5	380	11,1214	0,3400

Weiterhin gilt für die minimal mögliche Beanspruchung $B_{\min} = B_1 = 270$ MPa und für die maximal mögliche Beanspruchung $B_{\max} = B_5 = 380$ MPa. Die empirischen Erwartungswerte \bar{N}_i , die empirischen Standardabweichungen $s_{\mathbf{N}_i}$ sowie der empirische Variationskoeffizient der maximalen Nutzungsdauern für die einzelnen Beanspruchungsniveaus sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Die Tabelle zeigt, dass die Annahme 5 zum Lebensdauermodell bezüglich der Zunahme der Standardabweichungen und der Mittelwerte bei sinkender Beanspruchung (siehe Abschnitt 5.1.1) bei diesem Modell nicht zutreffend ist. Diese Abweichung von den Annahmen kann im Weiteren vernachlässigt werden.

Tabelle 5.2: *Empirische Erwartungswerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten*

Index	Beanspruchungs- niveau	\bar{N}_i	$s_{\mathbf{N}_i}$	VK (\mathbf{N}_i)
1	B_1	13.029.959	5.060.734	0.3884
2	B_2	8.610.483	3.952.744	0.4591
3	B_3	1.998.680	864.060	0.4323
4	B_4	312.032	182.188	0.5839
5	B_5	71.336	23.482	0.3292

Die Approximation des Verlaufs von $\log(\bar{N}_i)$ und $\log(\bar{N}_i \pm s_{\mathbf{N}_i})$ nach (5.1) mit einem Polynom erster Ordnung führt zu den Parametern $a_{x,1}$ und b_x nach Tabelle 5.3. Die dritte Spalte der Tabelle gibt eine Schätzung der mittleren absoluten Abweichung

$$\bar{\Delta}_x = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i \left[\log(\hat{N}_j + (x-2) \hat{s}_{N_j}) - \log(\bar{N}_j + (x-2) s_{N_j}) \right]$$

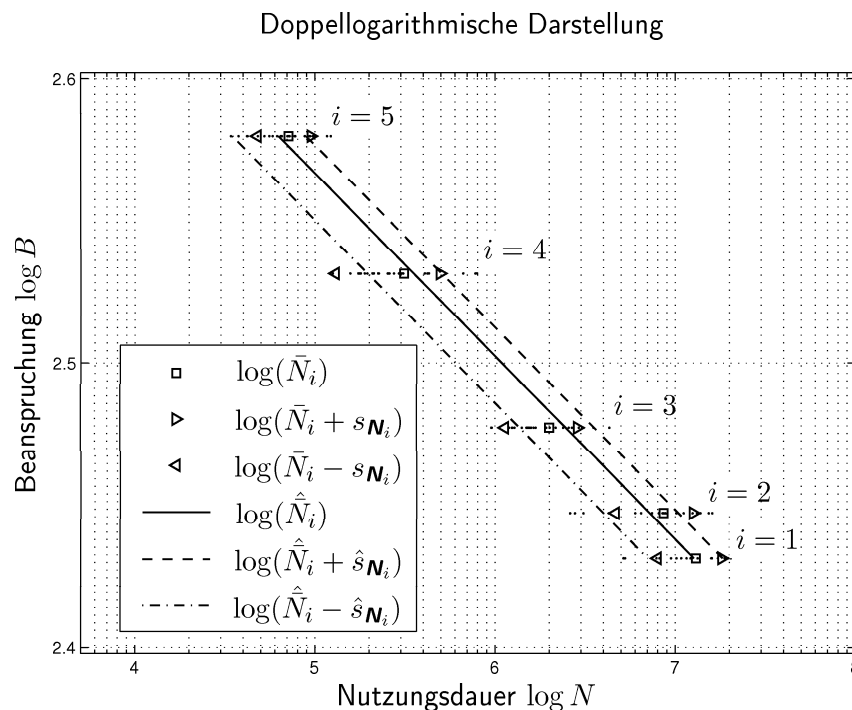
der Näherung von der realen Lösung an. Die Bestimmung der Parameter $a_{x,1}$ und b_x erfolgt nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate.

In Abbildung 5.12 sind die empirischen Werte für $\log(\bar{N}_i)$ und $\log(\bar{N}_i \pm s_{\mathbf{N}_i})$ den Werten der approximierten Größen $\log(\hat{N}_i)$ und $\log(\hat{N}_i \pm \hat{s}_{\mathbf{N}_i})$ nach (5.1) gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Abweichung von $\hat{N}_i \pm \hat{s}_{\mathbf{N}_i}$ zu $\bar{N}_i \pm s_{\mathbf{N}_i}$

Tabelle 5.3: *Parameter der Näherungslösung nach (5.1) mit $l = 1$*

x	$a_{x,1}$	b_x	$\bar{\Delta}_x$
1	-15,531	44,609	0,1739
2	-15,537	44,879	0,0976
3	-15,581	45,147	0,087

für die einzelnen Beanspruchungsniveaus unterschiedlich hoch ist. Besonders groß sind die Abweichungen für $i = 4$ und $i = 5$. Die relativen Abweichungen betragen hier 27 % bzw. 50 %, was dem vorgegebenen Konfidenzintervall der Approximation entspricht. In [Shimokawa u. Hamaguchi, 1987] wird die approximierte Kurve nach (5.1) in zwei Abschnitte unterschiedlicher Steigung unterteilt. Der erste Abschnitt gilt für Beanspruchungen $B_i \geq 300$ MPa und der zweite Abschnitt mit einer geringeren Steigung für $B_i < 300$ MPa. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf eine derartige Unterteilung der approximierten Lebensdauerkennlinie verzichtet, da eine direkte experimentelle Validierung der Simulationsergebnisse nicht erfolgt und das Beispiel möglichst einfach gehalten werden sollte. Die Anwendung einer zweigeteilten Lebensdauerkennlinie oder einer Approximation mittels Polynomen höherer Ordnung würde eine bessere Anpassung des Modells an die empirischen Daten bedeuten und wäre im Rahmen einer direkten Übertragbarkeit der Ergebnisse auf einen konkreten Anwendungsfall sinnvoll.

Abbildung 5.12: *Darstellung der Approximation von N_i und s_{N_i}*

5.2.2 Lebensdauerberechnung

Zur Berechnung der Zuverlässigkeitskenngröße \mathcal{Z} werden aus dem Lebensdauermodell aus Abschnitt 5.2.1 die zentralen statistischen Momente der akkumulierten Schädigung \mathbf{D}_i und der kritischen Schädigung \mathbf{D}_i^* während der i -ten Nutzung n_i ermittelt. Es wird die Annahme getroffen, dass die Belastungen für jede Einzelnutzung deterministisch ermittelt werden können. Bei bekannter Verteilungsdichte $f_{\mathbf{N}_i}$ und unter Annahme der Gültigkeit der stochastischen Miner-Regel als einfachsten Fall ergeben sich die zentralen statistischen Momente des Schädigungsinkrements $\mathbf{d}_i = g(\mathbf{N}_i, \dots)$ aus

$$f_{\mathbf{d}_i}(d_i) = f_{\mathbf{N}_i}(N_i) \left| \frac{\partial N_i}{\partial d_i} \right|. \quad (5.14)$$

Mit dem Ansatz zur stochastischen Schadensakkumulation nach [Min u. a., 1995] und Gleichung (3.31) gilt für eine Nutzung von $n_i = 1$

$$\frac{\partial N_i}{\partial d_i} = -\frac{1}{d_i^2}$$

und es folgt

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{d}_i}(d_i) &= f_{\mathbf{N}_i}(N_i) \frac{1}{d_i^2} \\ &= \frac{1}{N_i \sigma_{\text{LN}, \mathbf{N}_i} \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(\ln N_i - \mu_{\text{LN}, \mathbf{N}_i})^2}{2\sigma_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}^2} \right) \frac{1}{d_i^2} \\ &= \frac{1}{d_i \sigma_{\text{LN}, \mathbf{N}_i} \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(\ln d_i + \mu_{\text{LN}, \mathbf{N}_i})^2}{2\sigma_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}^2} \right). \end{aligned}$$

Da \mathbf{d}_i vom gleichen Verteilungstyp wie \mathbf{N}_i ist, gilt

$$\sigma_{\text{LN}, \mathbf{d}_i} = \sigma_{\text{LN}, \mathbf{N}_i} \quad \text{und} \quad \mu_{\text{LN}, \mathbf{d}_i} = -\mu_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}. \quad (5.15)$$

Die Momente $E(\mathbf{N}_i) \approx \bar{N}_i$ und $\sigma_{\mathbf{N}_i} \approx s_{\mathbf{N}_i}$ der Lognormalverteilung von \mathbf{N}_i werden aus der Polynom-Näherung aus 5.2.1 mit den Parametern aus Tabelle 5.3 ermittelt. Somit ergibt sich

$$\bar{N}_i = B_i^{a_2, 1} 10^{b_2} = B_i^{a_2} 10^{b_2} \quad (5.16)$$

für den Mittelwert der maximalen Nutzungsdauer und

$$s_{\mathbf{N}_i} = B_i^{a_2, 1} 10^{b_2} - B_i^{a_1, 1} 10^{b_1} = B_i^{a_2} 10^{b_2} - B_i^{a_1} 10^{b_1} \quad (5.17)$$

für die empirische Standardabweichung. Über die Beziehungen (3.13) und (3.14) können diese Größen in die Parameter $\mu_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}$ und $\sigma_{\text{LN}, \mathbf{N}_i}$ einer entsprechenden Lognormalverteilung umgerechnet werden. Die Umrechnung von $\mu_{\text{LN}, \mathbf{d}_i}$ und $\sigma_{\text{LN}, \mathbf{d}_i}$ nach $E(\mathbf{d}_i)$ und $\sigma_{\mathbf{d}_i}$ erfolgt mit (3.11) und (3.12). Daraus folgt

$$E(\mathbf{d}_i) = \frac{\bar{N}_i^2 + s_{\mathbf{N}_i}^2}{\bar{N}_i^3} \quad (5.18)$$

und

$$\sigma_{\mathbf{d}_i} = \sqrt{\frac{s_{\mathbf{N}_i}^2 (\bar{N}_i^2 + s_{\mathbf{N}_i}^2)^2}{\bar{N}_i^8}} \quad (5.19)$$

Für andere Ansätze zur Schadensakkumulation kann die Berechnung durch die entsprechende Substitution von d_i mit der jeweiligen Formel zur Beschreibung des Schädigungsinkrements (Abschnitt 3.2.3) nach Ansatz (5.14) erfolgen.

Die Momente der akkumulierten Schädigung bzw. die Näherungen \bar{D}_i und $s_{\mathbf{D}_i}$ werden entsprechend der stochastischen Miner-Regel (3.33) und den Rechenregeln (3.5) aufsummiert. Durch Einsetzen der Gleichungen (5.18) und (5.19) in den Gleichungen

$$\bar{D}_i = \sum_{j=1}^i E(\mathbf{d}_j) \quad \text{und} \quad s_{\mathbf{D}_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^i \sigma_{\mathbf{d}_j}^2}$$

ergeben sich

$$\bar{D}_i = \sum_{j=1}^i \frac{\bar{N}_j^2 + s_{\mathbf{N}_j}^2}{\bar{N}_j^3} \quad (5.20)$$

und

$$s_{\mathbf{D}_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^i \frac{s_{\mathbf{N}_j}^2 (\bar{N}_j^2 + s_{\mathbf{N}_j}^2)^2}{\bar{N}_j^8}} \quad (5.21)$$

für die Parameter der Verteilung. Diese entspricht nach dem zentralen Grenzwertsatz annähernd einer Normalverteilung $N(\bar{D}_i, s_{\mathbf{D}_i})$. Beide Parameter sind durch Einsetzen von (5.16) und (5.17) nur noch von der Beanspruchungshistorie B_1, \dots, B_j abhängig.

Die Parameter \bar{D}_i^* und $s_{\mathbf{D}_i}^*$ als Näherungslösungen für $E(\mathbf{D}_i^*)$ und $\sigma(\mathbf{D}_i^*)$ werden nach den vereinfachenden Annahmen (5.9) und (5.10) für metallische Werkstoffe berechnet. Da der untersuchte Werkstoff CFK in seinen Materialeigenschaften von metallischen Werkstoffen abweicht, ist die Genauigkeit des Ergebnisses reziprok proportional zum Grad der Abweichung der diesbezüglichen Eigenschaften von CFK gegenüber metallischen Werkstoffen. Für die Durchführung der hier vorgestellten numerischen Simulationen sollen die gewählten Annahmen ausreichend sein. Bei einer experimentellen Untersuchung sollte hingegen ein Wert für $E(\mathbf{D}_i^*)$ gewählt werden, der die realen Zusammenhänge genauer wiedergibt. Mit den Annahmen (5.9) und (5.10) folgt

$$E(\mathbf{D}_i^*) = 1 \quad \text{und} \quad s_{\mathbf{D}_i}^* = B_i^{a_2} 10^{b_2} - B_i^{a_1} 10^{b_1}$$

für den Erwartungswert und die Standardabweichung von \mathbf{D}_i^* . Da nach den Überlegungen von Abschnitt 5.1.2 die kritische Schädigung \mathbf{D}_i^* vom gleichen Verteilungstyp

ist wie \mathbf{N}_i , folgt $\mathbf{D}_i^* \sim \text{LN}(\mu_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*}, \sigma_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*})$. Die Größen $E(\mathbf{D}_i^*)$ und $s_{\mathbf{D}_i^*}$ müssen nach (3.13) und (3.14) in die Parameter $\mu_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*}$ und $\sigma_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*}$ transformiert werden. Die Parameter ergeben sich zu

$$\mu_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*} = -\frac{1}{2} \ln [s_{\mathbf{N}_i}^2 + 1] = -\frac{1}{2} \ln \left[(B_i^{a_2} 10^{b_2} - B_1^{a_1} 10^{b_1})^2 + 1 \right] \quad (5.22)$$

und

$$\sigma_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*} = \sqrt{\ln [s_{\mathbf{N}_i}^2 + 1]} = \sqrt{\ln \left[(B_i^{a_2} 10^{b_2} - B_1^{a_1} 10^{b_1})^2 + 1 \right]} \quad (5.23)$$

als Funktionen der aktuellen Beanspruchung B_i .

Der Ansatz zur analytischen Lösung nach (5.5) ergibt das Faltungsintegral

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\mathbf{D}_i}(D_i) F_{\mathbf{D}_i^*}(D_i) dD_i = & \quad (5.24) \\ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s_{\mathbf{D}_i} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(D_i - \bar{D}_i)^2}{2s_{\mathbf{D}_i}^2} \right] \frac{1}{\sigma_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*} \sqrt{2\pi}} \int_0^{D_i} \frac{1}{D_i} \exp \left[-\frac{\ln D_i - \mu_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*}}{2\sigma_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*}} \right] dD_i = \\ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s_{\mathbf{D}_i} \sigma_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*} 2\pi} \exp \left[-\frac{(D_i - \bar{D}_i)^2}{2s_{\mathbf{D}_i}^2} \right] \int_0^{D_i} \frac{1}{D_i} \exp \left[-\frac{\ln D_i - \mu_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*}}{2\sigma_{\text{LN}, \mathbf{D}_i^*}} \right] dD_i. \end{aligned}$$

Durch das Einsetzen von (5.20) und (5.21) mit (5.16) und (5.17) sowie (5.22) und (5.23) in (5.24) ergibt sich ein Ansatz zur Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngröße nach (5.3), der nur von den Eingangsgrößen B_1, \dots, B_i abhängt. Auf Grund der Summenfunktionen in (5.20) und (5.21) sowie den vorhandenen Nichtlinearitäten und der daraus resultierenden Komplexität liegt es nahe, dass eine analytische Lösung von (5.24) nur schwer möglich ist. Aus diesem Grund erfolgt die Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngröße im Rahmen der Simulation nach der *Advanced Second-Moment Method* (siehe Abschnitt 5.1.2).

5.2.3 Prognoseannahmen

Folgende zukünftige Beanspruchungs-Zeit-Verläufe werden im Rahmen der Prognose berücksichtigt:

1. Konstante Beanspruchungen entsprechend dem letzten Beanspruchungsniveau

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = B_i$$

2. *Best-case* Szenario: Konstante Beanspruchungen entsprechend dem minimal möglichen Beanspruchungsniveau

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = B_{\min}$$

3. *Worst-case* Szenario: Konstante zukünftige Beanspruchungen entsprechend dem maximal möglichen Beanspruchungsniveau

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = B_{\max}$$

4. Die Beanspruchungen werden entsprechend den letzten q Beanspruchungen

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = B_{i-q+1}, \dots, B_i$$

gewählt. Hierbei wird q entweder als konstante Größe gewählt oder als Zahl der Beanspruchungen, die als Periode detektiert wurden. Die Erkennung einer Periode im Beanspruchungs-Zeit-Verlauf erfolgt mittels einer diskreten Fouriertransformation und dem daraus resultierenden Leistungsspektrum. Es wird angenommen, dass das erste Maximum des Leistungsspektrums in diesem Fall die Periode des Beanspruchungs-Zeit-Verlaufs definiert. Sollte die Frequenz des ersten Maximums oberhalb von 5 % des gesamten Frequenzbereichs oder unterhalb von Frequenzen $\nu \leq 1.8$ Hz liegen, so wird angenommen, dass keine Periodizität vorliegt.

- 5a. Konstante Beanspruchungen entsprechend der mittleren bisherigen Beanspruchung plus der dreifachen Standardabweichung (entsprechend den unteren 99,85 % der bisherigen Beanspruchungsniveaus bei Annahme einer normalverteilten Beanspruchung)

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = \bar{B} + 3s_B$$

- 5b. Konstante Beanspruchungen entsprechend der mittleren bisherigen Beanspruchung plus der zweifachen Standardabweichung (entsprechend den unteren 97,75 % der bisherigen Beanspruchungsniveaus bei Annahme einer normalverteilten Beanspruchung)

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = \bar{B} + 2s_B$$

- 5c. Konstante Beanspruchungen entsprechend der mittleren bisherigen Beanspruchung plus der einfachen Standardabweichung (entsprechend den unteren 84 % der bisherigen Beanspruchungsniveaus bei Annahme einer normalverteilten Beanspruchung)

$$\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = \bar{B} + s_B$$

5.2.4 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation des SRCE-Konzepts nach den Modellen und Annahmen aus den vorhergehenden Abschnitten aufgeführt und analysiert. Für die Simulation der Zuverlässigkeitskenngrößen und der maximalen Nutzungsdauern wurden sechs unterschiedliche Beanspruchungs-Zeit-Verläufe gewählt.

Die einzelnen Verläufe sowie die zugehörige Trajektorie der Zuverlässigkeitskenngröße Ausfallwahrscheinlichkeit (3.1) sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Als Abbruchkriterium gilt das Überschreiten einer kritischen Ausfallwahrscheinlichkeit

$$F_{\text{krit}} = 0.01 \quad (5.25)$$

oder das Erreichen der Soll-Nutzungsdauer N_{Soll} . Die Beanspruchungsfolgen der einzelnen Beanspruchungs-Zeit-Verläufe werden solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Der Faktor zur Multiplikation der Nutzungen ergibt sich aus der gewählten Anzahl der Simulationsschritte, die bis zum Erreichen von N_{Soll} durchgeführt werden sollen. Ein kleinerer Wert beschleunigt die Simulation, während ein größerer Wert ihre Genauigkeit erhöht. Für alle Simulationsläufe wurden 500 Simulationsschritte gewählt. Somit entspricht eine Nutzung von $n_i = 1$ genau $n \times 500$ Anwendung mit der zugehörigen Beanspruchung B_i .

Die einzelnen Beanspruchungs-Zeit-Verläufe sind wie folgt aufgebaut:

- A) Dieser Verlauf besteht aus stufenweise ansteigenden Beanspruchungsniveaus. Diese beginnen bei 280 MPa und steigern sich über 290 MPa auf 305 MPa. Jede Beanspruchungsstufe wird für $n = 23.330$ Nutzungen appliziert. Die Soll-Nutzungsdauer liegt bei $N_{\text{Soll}} = 550.000$.
- B) Diese Folge von Beanspruchungen ist ähnlich zur Folge A. Im Unterschied zu dieser beginnt sie bei 270 MPa und steigert sich über 273 MPa auf 276 MPa. Die Beanspruchungen sind somit geringer als im Fall A. Dies ist deutlich an der größeren erreichbaren Soll-Nutzungsdauer von $N_{\text{Soll}} = 1.700.000$ zu erkennen.
- C) Beanspruchungsfolge C besteht aus einer Folge von Beanspruchungsniveaus von 275, 278, 275 und 273 MPa. Im Gegensatz zu Beanspruchungsfolge B wird in diesem Fall ein annähernd alternierender Beanspruchungsverlauf erzielt. Das Beanspruchungsniveau wechselt alle 24.000 Nutzungen. Die zu erreichende Nutzungsdauer beträgt $N_{\text{Soll}} = 1.608.000$.
- D) Hier ergibt sich die Beanspruchungsfolge aus 400 Werten einer Normalverteilung mit den Parametern $\mu = 275$ MPa und $\sigma = 2$ MPa. Die zu erwartende mittlere Soll-Nutzungsdauer aus fünf Testläufen beträgt $\bar{N}_{\text{Soll}} = 1.612.000$ Nutzungen. Diese Beanspruchungsfolge ähnelt daher der Beanspruchungsfolge C, hat jedoch im Unterschied zu dieser einen stochastischen Charakter.
- E) Hier liegt eine Grundbeanspruchung von $B_{\text{Grund}} = 285$ MPa vor. Diese wird von einer sinusförmigen Beanspruchung mit einer Amplitude von $B_A = 10$ MPa und einer stochastischen Beanspruchung mit einer Normalverteilung der Form $N(0, 5)$ überlagert. Die geforderte mittlere Nutzungsdauer beträgt $\bar{N}_{\text{Soll}} = 870.500$ Nutzungen.
- F) Diese Beanspruchungsfolge setzt sich zusammen aus 21.280 Nutzungen der Höhe $B_1 = 260$ MPa, gefolgt von 212.800 Nutzungen der Höhe $B_2 = 285$ MPa. Anschließend folgen wieder 21.280 Nutzungen auf dem Beanspruchungsniveau B_1 . Der gesamte Verlauf ist mit einer normalverteilten Beanspruchung mit

einem Mittelwert von $\mu = 0$ MPa und einer Standardabweichung von $\sigma = 3$ MPa überlagert. Die mittlere Soll-Nutzungsdauer beträgt $\bar{N}_{\text{Soll}} = 1.064.200$.

Im Weiteren wird die Soll-Nutzungsdauer durch die Größe N_{Soll} ausgedrückt, unabhängig davon, ob es sich um eine deterministische Größe nach der Beanspruchungsfolge A, B oder C oder um den Mittelwert \bar{N}_{Soll} nach der Beanspruchungsfolge D, E oder F handelt.

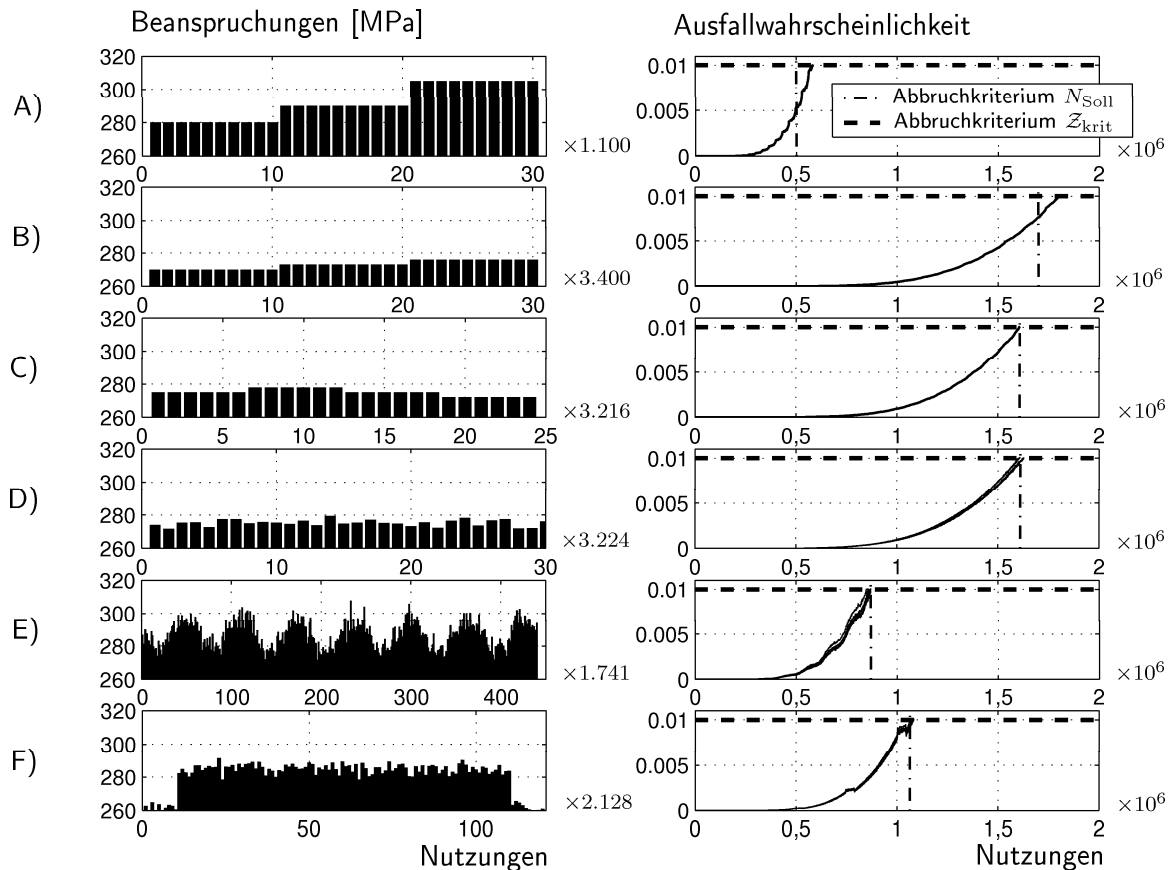


Abbildung 5.13: Geplante Beanspruchungsverläufe und Trajektorie der Zuverlässigkeitskenngröße

In den Verläufen der Ausfallwahrscheinlichkeit ist die Stufung der jeweiligen Beanspruchungsfolgen sehr gut in Form von unterschiedlichen Steigungen im Kurvenverlauf wiedererkennbar. Besonders auffällig ist dies bei den Kurven der Ausfallwahrscheinlichkeit für die Beanspruchungsfolgen A, E und F ausgeprägt. Diese weisen die größten Änderungen der Beanspruchungsniveaus auf. Die Abhängigkeit der maximalen Nutzungsdauer von der durchschnittlichen Beanspruchungshöhe ist ebenfalls gut zu erkennen. So haben die Beanspruchungsfolgen C und D mit $\bar{B} = 275$ MPa eine fast identische maximale Nutzungsdauer. Die Beanspruchungsfolge B mit $\bar{B} = 273$ MPa weist hingegen eine leicht höhere maximale Nutzungsdauer auf.

Vergleich der Prognosevarianten

Im Folgenden wurde für alle Beanspruchungsverläufe bei jeder Nutzung mit einer Wahrscheinlichkeit von 2 % eine Erhöhung sämtlicher Niveaus des Beanspruchungsverlaufs um +1 MPa vorgenommen. Dies soll ein positives Driften der Beanspruchungsniveaus, bedingt durch eine Verringerung der Beanspruchbarkeit auf Grund von Schädigung, Verschleiß etc. simulieren. Die Abweichung der Beanspruchungsverläufe mit und ohne Drift ist in Abbildung 5.14 dargestellt. In Abbildung 5.15 sind sowohl für die driftbehaftete Beanspruchungsfolge als auch für die störungsfreie Beanspruchungsfolge der Kurvenverlauf der Zuverlässigkeitskenngröße und die zu erwartende maximale Nutzungsdauer nebeneinander aufgetragen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit bei den Beanspruchungsverläufen mit Driftverhalten ist gestrichelt dargestellt. Die zu erwartenden maximalen Nutzungsdauern $N_{Z_{krit}}$ bei Erreichen von Z_{krit} sowie die Zuverlässigkeitskenngröße $F_{N_{Soll}}$ beim Erreichen von N_{Soll} sind in Tabelle 5.4 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit beim Erreichen der maximalen Soll-Nutzungsdauer um den Faktor 1,5 bis $\sim 8,7$ größer ist als die kritische Ausfallwahrscheinlichkeit F_{krit} . Der Faktor ist direkt abhängig von dem Maß der Abweichung zwischen Soll- und Ist-Beanspruchungsverlauf. Die erzielte maximale Nutzungsdauer beim Erreichen der kritischen Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt zwischen 63 % und 88 % der vorgegebenen maximalen Soll-Nutzungsdauer.

Tabelle 5.4: *Zu erwartende Ausfallwahrscheinlichkeit $F_{N_{Soll}}$ und maximale Nutzungsdauer $N_{Z_{krit}}$ bei veränderten Beanspruchungsverläufen*

Beanspruchungsverlauf	$F_{N_{Soll}}$	$N_{Z_{krit}}$	$N_{Z_{krit}}/N_{Soll}$
A	0,04591	433.400	78,8 %
B	0,01917	1.502.800	88,4 %
C	0,06186	1.112.736	69,2 %
D	0,04637	1.241.240	77,0 %
E	0,08687	548.415	63,0 %
F	0,02475	878.864	82,6 %

Die unterschiedliche Differenz der maximal zu erreichenden Nutzungsdauern ist primär davon abhängig, wie oft eine Drift von +1 MPa im Beanspruchungsverlauf erfolgt. Aussagen über den Zusammenhang zwischen dem qualitativen Verlauf einer Beanspruchungsfolge und der Differenz $N_{Soll} - N_{Z_{krit}}$ sind daher nicht sinnvoll. Es zeigt sich lediglich der Trend, dass die Differenz bei größeren Soll-Nutzungsdauern, wie bei den Beanspruchungsfolgen B, C und D, höher ausfallen. Dies ist mit dem häufigeren Auftreten von Drifterscheinungen während der Simulation zu erklären.

Die Ergebnisse der einzelnen Prognosen der maximalen Nutzungsdauer \hat{N} beim Erreichen des Kriteriums $F_i = F_{krit}$ für die unterschiedlichen Beanspruchungsfolgen sind in den Abbildungen 5.16, 5.18, 5.20, 5.21 und 5.23 dargestellt. Hierbei sind die prognostizierten Werte der maximalen Nutzungsdauer \hat{N} als Punkte dargestellt. Die sich ergebende maximale Nutzungsdauer $N_{Z_{krit}}$ ist als durchgezogene Linie angegeben. Wenn die Prognosen eine maximale Nutzungsdauer $\hat{N} > N_{Soll}$ vorhersagen, so

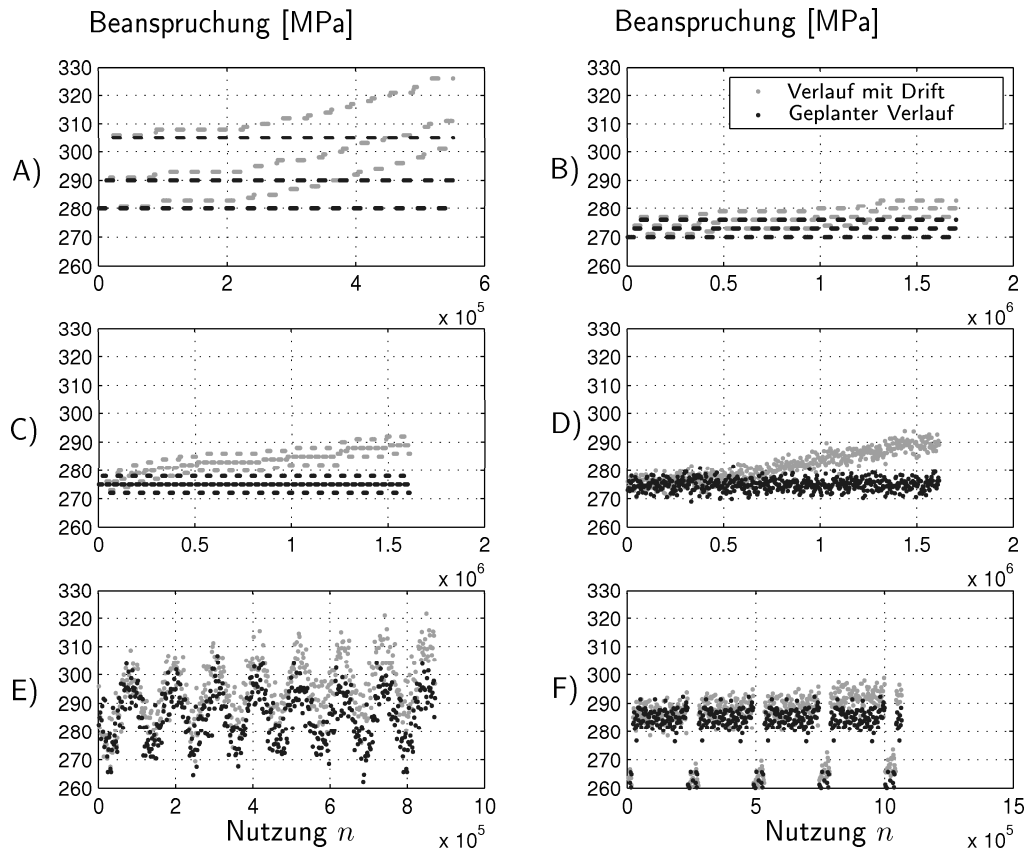


Abbildung 5.14: Vergleich der geplanten Beanspruchungsverläufe mit den veränderten Beanspruchungsverläufen

wird dieses Ergebnis in den Abbildungen 5.16 bis 5.23 nicht aufgeführt. Es werden nur die Prognoseergebnisse berücksichtigt, die einen vorzeitigen Ausfall vorhersagen. Allgemein zeigt sich, dass die Prognosegenauigkeit mit steigender Nutzungsdauer zunimmt.

Die Prognosen der zu erwartenden Ausfallwahrscheinlichkeit \hat{F} beim Erreichen der maximalen Nutzungsdauer $N = N_{\text{Soll}}$ sind in den Abbildungen 5.17, 5.19, 5.22 und 5.24 abgebildet. Die prognostizierten Ausfallwahrscheinlichkeiten oberhalb von F_{krit} sind als Punkte dargestellt. Zusätzlich ist die jeweilige tatsächliche Ausfallwahrscheinlichkeit $F_{N_{\text{Soll}}}$ als durchgezogene Linie wiedergegeben.

Bei der Prognose 1 in Abbildung 5.16 zeigt sich, dass bereits bei Nutzungen nahe $n = 1.500$ eine verringerte Maximalnutzungsdauer vorhergesagt wird. Auffallend ist, dass bei Beanspruchungsfolge A und B diese Aussage nicht kontinuierlich vorliegt. Vielmehr wird in der ersten Hälfte der simulierten Nutzungen (Beanspruchungsfolge A) bzw. im ersten Fünftel der simulierten Nutzungen (Beanspruchungsfolge B) nur bei höheren Beanspruchungen ein vorzeitiger Ausfall prognostiziert. Dies hängt zum einen mit der Art der Prognose ($\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = B_i$) und zum anderen mit der geringen Ausfallwahrscheinlichkeit von $F_{N_{\text{Soll}}} \approx 0.005$ bei Beanspruchungsfolge A zusammen. Die Art der Prognose ist auch für die Streuung der Prognosewerte verantwortlich, die charakteristisch für den jeweiligen Beanspruchungsverlauf ist. Hohe Beanspru-

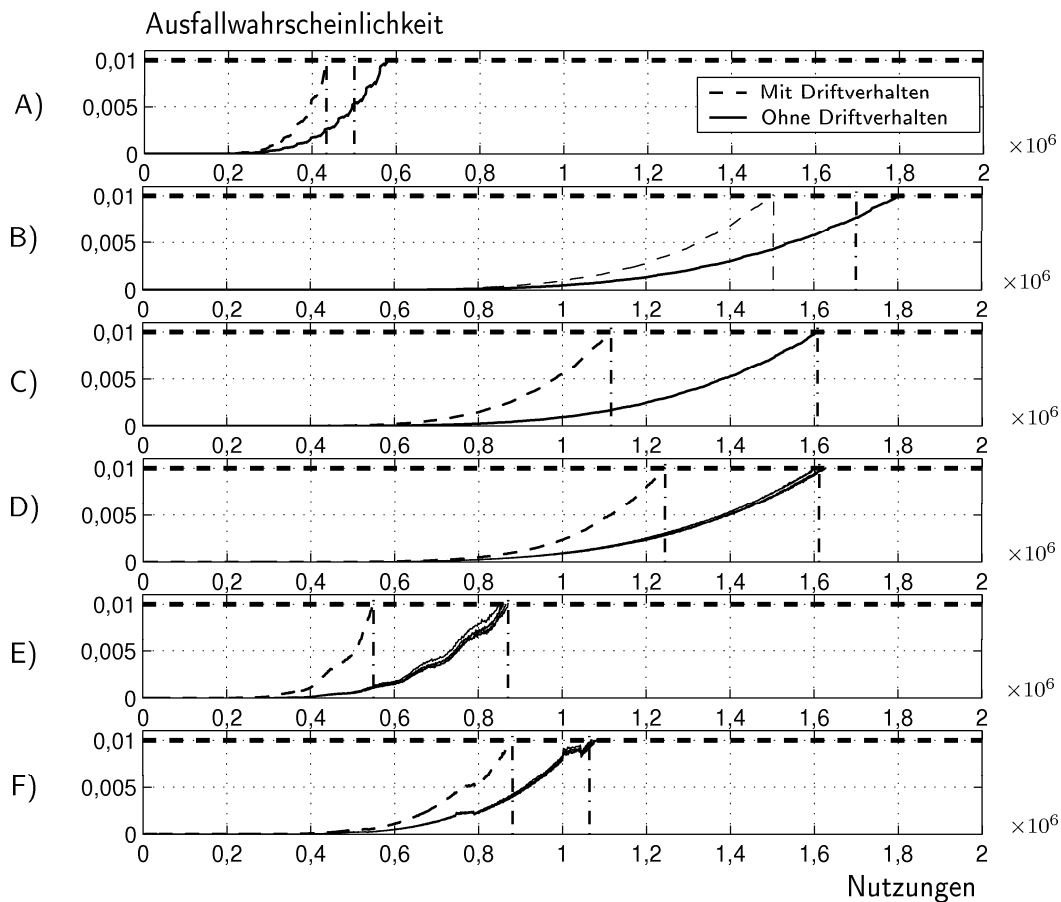


Abbildung 5.15: Vergleich der Ergebnisse bei einem positiven Driftverhalten im Beanspruchungsverlauf zu einem Verlauf ohne Driftverhalten

chungen führen zu einer geringen prognostizierten Maximalnutzungsdauer, niedrige Beanspruchungen hingegen zu einer hohen Maximalnutzungsdauer. Dies erklärt die nicht dargestellten Prognosewerte bei Beanspruchungsverlauf F. Hier wurde für die geringen Beanspruchungen eine Maximalnutzungsdauer $\hat{N} > N_{\text{Soll}}$ prognostiziert. Der Charakter der Beanspruchungsfolgen, der alternierend, stochastisch, sprungförmig etc. sein kann, wird bei der Prognose nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse der prognostizierten Ausfallwahrscheinlichkeit bei N_{Soll} (Abbildung 5.17) zeigen, dass die Prognose 1 den wahren Wert der zu erwartenden Ausfallwahrscheinlichkeit am genauesten vorhersagt, wenn die Spannweite der auftretenden Beanspruchungen gering ist, wie bei den Beanspruchungsverläufen B, C und D. Da Prognose 1 zukünftige konstante Beanspruchungen in Höhe der letzten auftretenden Beanspruchung annimmt, ist dieser Zusammenhang nahe liegend. Zudem scheint ein Zusammenhang zwischen der Höhe der zu erwartenden Ausfallwahrscheinlichkeit und dem Konvergenzverhalten der Prognose zu bestehen. Liegt $F_{N_{\text{Soll}}}$ nahe bei F_{krit} (5.25), so konvergiert die Prognose schnell mit dem wahren Wert (Beanspruchungsfolge B) wohingegen eine größere Differenz $F_{N_{\text{Soll}}} - F_{\text{krit}}$ zu einer späteren Konvergenz der Prognose führt. Dies ist deutlich an einem Vergleich zwischen den Beanspruchungsfolgen B und C

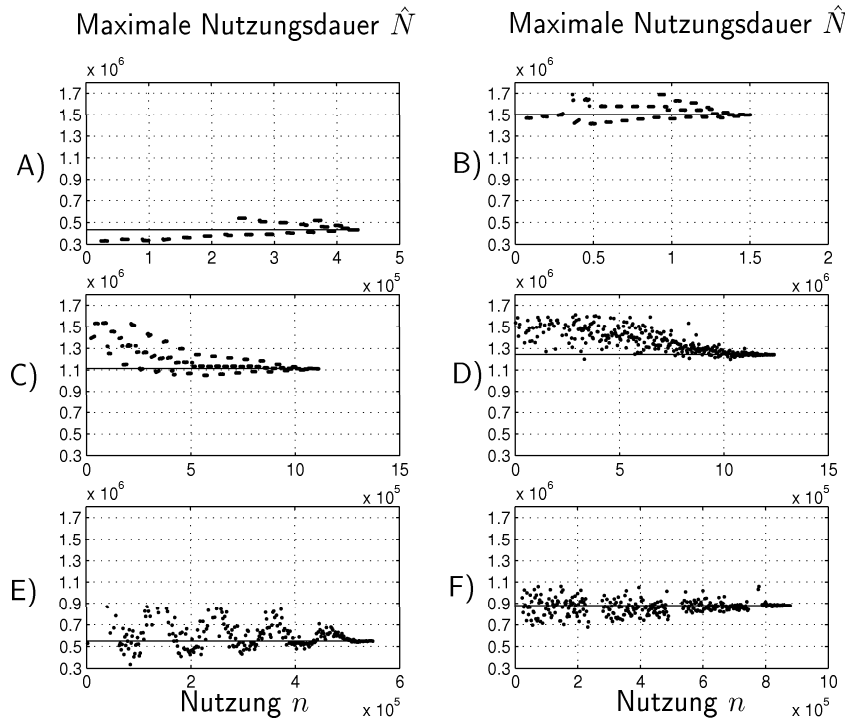


Abbildung 5.16: Ergebnisse der Prognose 1, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}

zu erkennen. Beide Beanspruchungsfolgen haben eine ähnlich große Spannweite der Beanspruchungen. Der Wert der erwarteten Ausfallwahrscheinlichkeit ist bei C jedoch wesentlich höher als bei B. Demzufolge konvergiert die Prognose erst zu einem späteren Zeitpunkt. Die Prognose 1 führt somit schneller zu einem realistischen Ergebnis, wenn die geplante Zuverlässigkeitskenngröße beim Ende der Nutzungsdauer nahe der kritischen Zuverlässigkeitskenngröße liegt und der Beanspruchungsverlauf keine große Streuung aufzeigt.

Bei den Ergebnissen nach Prognose 2 in Abbildung 5.18, die eine *best-case* Prognose darstellt, ist auffallend, dass die Prognose erst im letzten Sechstel der simulierten Nutzungen oder später, wie bei der Beanspruchungsfolge A, einen vorzeitigen Ausfall vorhersagt. Dies ist nachvollziehbar, da die Prognose 2 davon ausgeht, dass das System mit der minimal möglichen Beanspruchung betrieben wird. Ein prognostizierter vorzeitiger Ausfall bedeutet somit einen unvermeidbaren Ausfall. Gleiches gilt für die prognostizierte Ausfallwahrscheinlichkeit in Abbildung 5.19.

In Abbildung 5.20 sind die Ergebnisse der *worst-case* Prognose dargestellt. Es zeigt sich, dass die prognostizierte Maximalnutzungsdauer für alle Beanspruchungsverläufe kontinuierlich linear ansteigt. Im *worst-case* Fall, unter Annahme einer maximal möglichen Beanspruchung, ist die prognostizierte Nutzungsdauer somit geringfügig größer als die gegenwärtige Nutzungsdauer. Eine Änderung der Beanspruchung auf B_{max} führt somit relativ direkt zu einem Erreichen eines unververtretbaren zuverlässigkeitstechnischen Zustands und damit zum Ausfall. Die Berechnung der Prognosen für die Ausfallwahrscheinlichkeit konnte nicht durchgeführt werden, da der iterative Algorithmus der *Advanced Second Moment Method* in diesem Fall nicht konvergiert.

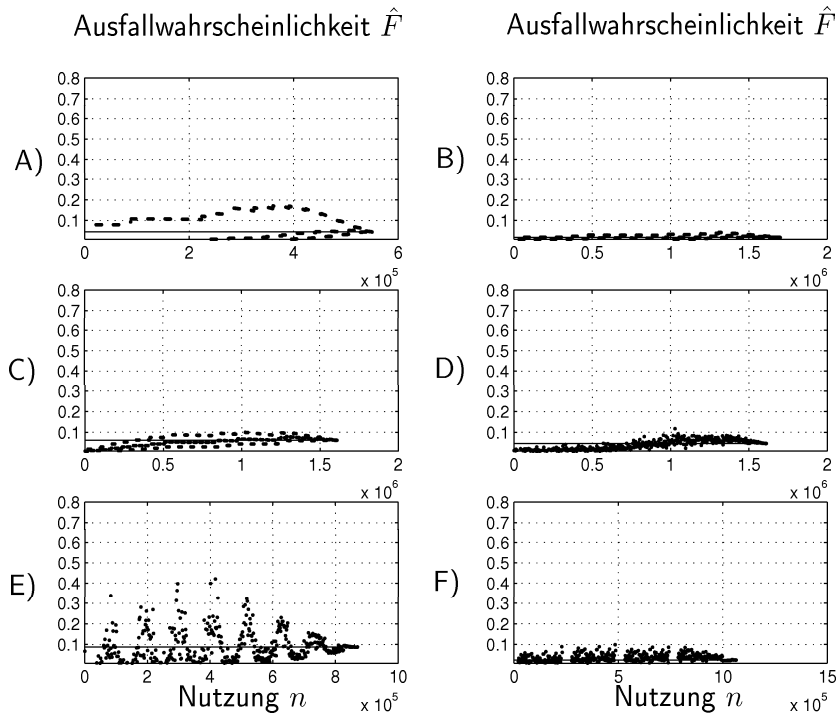


Abbildung 5.17: *Ergebnisse der Prognose 1, Ausfallwahrscheinlichkeit beim Erreichen von N_{Soll}*

Die Ergebnisse der Prognose 4 sind in Abbildung 5.21 wiedergegeben. Bei der Simulation mit dieser Prognose wurden unterschiedliche Werte für die Zahl q der vergangene Beanspruchungen, die nach $\hat{B}_j, \dots, \hat{B}_k = B_{i-q+1}, \dots, B_i$ bei der Prognose berücksichtigt werden sollen, gewählt. Zusätzlich wurde der Beanspruchungsverlauf auf seine Periodizität hin überprüft. Wenn eine Periodizität erkannt wurde, so entsprach q der Zahl der Beanspruchung innerhalb einer Periode. Konnte keine Periodizität ermittelt werden, so wurden $q = 10$ und $q = 30$ gewählt. Die Beanspruchungsverläufe E und F sind die einzigen Verläufe, in denen eine Periodizität erkannt wurde. Die Zahl der Beanspruchungen einer Periode im Verlauf E wurde zwischen $q = 23$ und $q = 50$ bestimmt. Im Verlauf F schwankt die Zahl zwischen $q = 18$ und $q = 130$. Ähnlich wie bei Prognose 1 ist auch bei Prognose 4 der Charakter der Beanspruchungsfolge gut zu erkennen. Die Genauigkeit der Prognose nimmt mit größer werdenden Werten für q zu. Gleichzeitig ist ein zeitlicher Versatz der Effekte der Beanspruchungsfolgen zu erkennen. Besonders gut ist dies in den Verläufen der Folgen E und F zu sehen. Hier kann die Charakteristik der Beanspruchungsfolge im Prognoseverlauf wiedererkannt werden. Mit steigenden Werten von q treten diese Charakteristiken mit einem zunehmenden zeitlichen Versatz auf. Der Effekt ähnelt der Bildung eines gleitenden Mittelwertes. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Prognose 1 zeigt sich, dass die Streuung und die Schwankung der prognostizierten Maximalnutzungsdauer bei Beanspruchungsverläufen mit stochastischen Komponenten, wie D, E und F, geringer ausfallen. Bei der Prognose der Ausfallwahrscheinlichkeit in Abbildung 5.22 zeigt sich ein ähnlicher Effekt. Die Streuung der Prognosewerte nimmt zunehmend ab, wenn bei der Prognose q vergangene Beanspruchungen

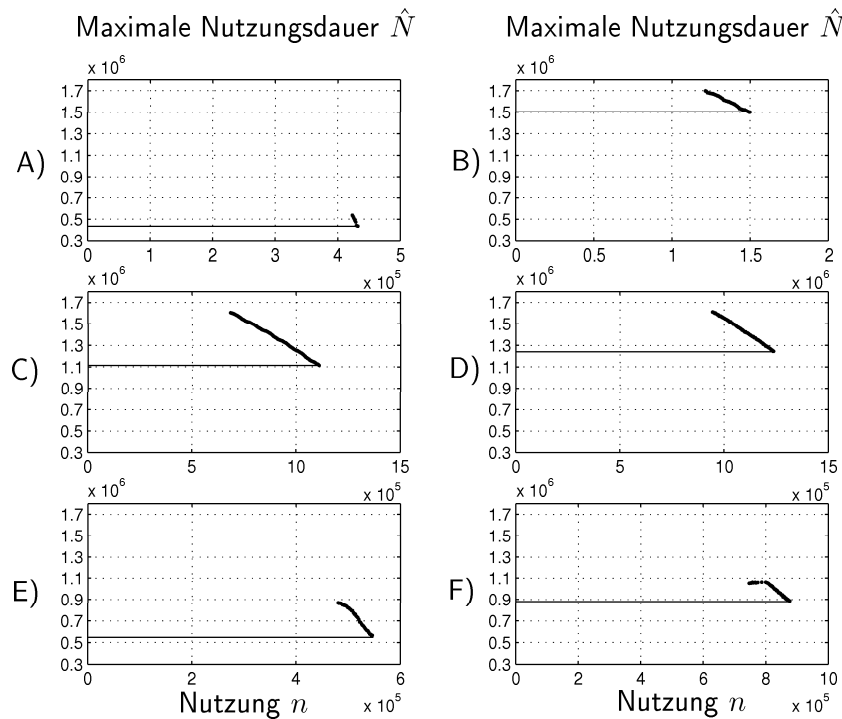


Abbildung 5.18: *Ergebnisse der Prognose 2, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}*

berücksichtigt werden. Dies ist deutlich an den Werten der Beanspruchungsfolgen von E und F im Vergleich von Abbildung 5.22 mit Abbildung 5.17 zu erkennen. Auch hier ist der Zusammenhang zwischen Streuspanne der Beanspruchungsfolge und Konvergenz der Prognose klar erkennbar.

Die Prognoseergebnisse nach Prognose 5 (Abbildung 5.23) zeigen für jeden Beanspruchungsverlauf drei unterschiedliche Kurven für die einzelnen Quantile (99,85 %, 97,75 % und 84 %). Es ist erkennbar, dass bei Beanspruchungsverläufen mit einer hohen Spanne der Beanspruchungsniveaus, wie bei den Beanspruchungsfolgen A, E und F, die Prognosen eher konservativ ausfallen und das 84-Quantil zu bevorzugen ist. Eine Ausnahme bilden die ersten Prognosen des Beanspruchungsverlaufs E. Hierdurch werden die extremen Beanspruchungsspitzen nicht mit in die Prognose einbezogen und die prognostizierte Nutzungsdauer konvergiert schneller mit der zu erwartenden Nutzungsdauer. Konservativ bedeutet in diesem Fall, dass die prognostizierten Maximalnutzungsdauern kleiner als der tatsächliche Wert der Maximalnutzungsdauer sind. Besonders auffallend ist dies bei den Beanspruchungsfolgen B und F. Nach Prognose 5 liegen die Werte für \hat{N} um 300.000 bis 450.000 Nutzungen unter den konservativsten Werten nach Prognose 1. Im Vergleich zur Prognose 4 sind es bis zu 600.000 Nutzungen weniger (Beanspruchungsfolge F). Unter dem Aspekt der Sicherheit wäre eine konservative Prognose durchaus vorzuziehen. Aus wirtschaftlichen Gründen und zum Ausnutzen der maximal möglichen Nutzungsdauer darf die Prognose nicht zu gering ausfallen, da sonst Nutzungspotenzial verloren gehen würde. Bei den Beanspruchungsverläufen B, C und D, die eine geringere Beanspruchungsspanne aufweisen, verhält sich der Sachverhalt nicht in dem Maße eindeutig,

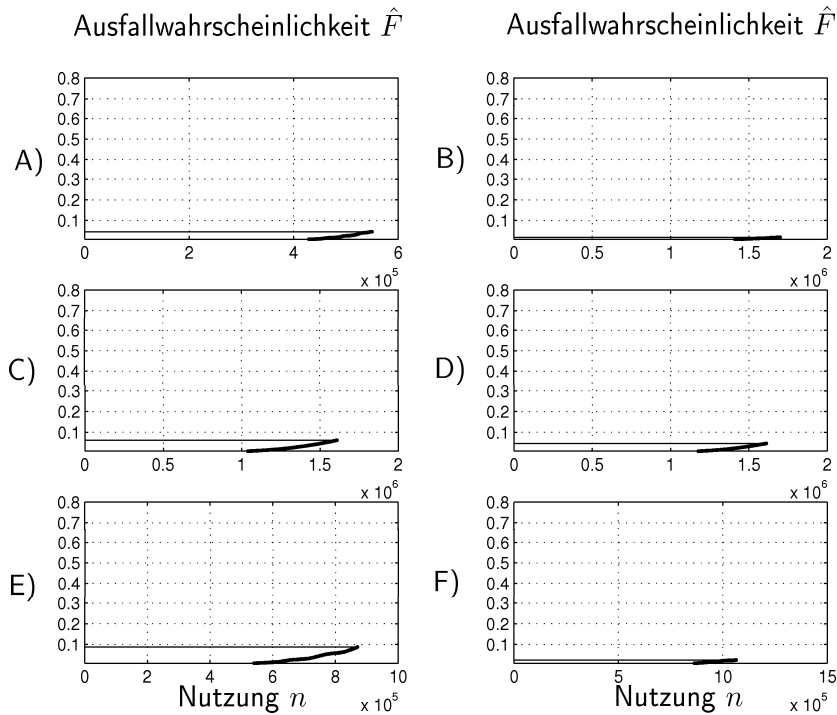


Abbildung 5.19: *Ergebnisse der Prognose 2, Ausfallwahrscheinlichkeit beim Erreichen von N_{Soll}*

wie oben beschrieben. Beim Beanspruchungsverlauf B konvergiert das 84-Quantil am schnellsten mit dem zu erwartenden Wert. Im Gegensatz zu den Verläufen A, E und F nähert sich die Prognose von der nicht konservativen Seite. Bei Verlauf C liefert anfangs das 97,75-Quantil die Ergebnisse mit der geringeren Abweichung vom realen Wert. Nach der Hälfte der Gesamtnutzungsdauer weisen die Ergebnisse der Prognose mit dem 84-Quantil die geringeren Abweichungen auf. Der Beanspruchungsverlauf D ist der einzige Verlauf, bei dem unter Berücksichtigung möglichst sämtlicher Beanspruchungsspitzen das Prognoseergebnis mit dem real zu erwartenden Wert konvergiert. Daher liefert die Prognose des 99,85-Quantils die besten Ergebnisse. Ursache hierfür ist, dass der Verlauf D nur aus einer rein stochastischen Komponente besteht und die Berücksichtigung sämtlicher Beanspruchungsniveaus notwendig ist, um den Beanspruchungs-Zeit-Verlauf optimal mit der Prognose 5 zu beschreiben. Im Vergleich zu den Prognosen 1 und 4 zeigt sich, dass Prognose 5 wesentlich unempfindlicher gegenüber Sprüngen im Beanspruchungsverlauf ist (Beispiele hierfür sind die Beanspruchungsfolgen A und F). Auch der Einfluss der wechselnden Beanspruchungen auf den Prognoseverlauf ist minimiert, wie im Vergleich zwischen Prognose 4 und 5 des Beanspruchungsverlaufs E zu erkennen ist. Ebenfalls kommt es nicht zu zwischenzeitlichen Prognosen der Form $\hat{N} \geq N_{\text{Soll}}$, da nicht die q letzten Beanspruchungen berücksichtigt werden, sondern sämtliche bisherigen Beanspruchungen. Bei der richtigen Wahl der Quantile konvergiert die Prognose schneller mit dem zu erwartenden Resultat. Eine Ausnahme bildet der Beanspruchungsverlauf C. Dieser konvergiert mit Prognose 4 und unter Berücksichtigung von $q = 30$ Vorbeanspruchungen schneller mit dem wahren Wert der Maximalnutzungsdauer

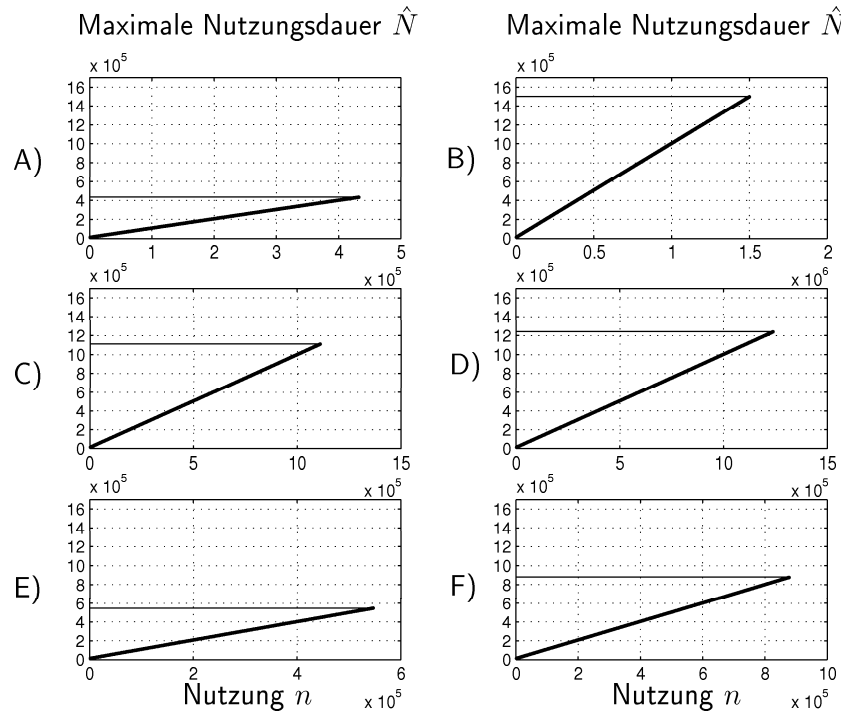


Abbildung 5.20: Ergebnisse der Prognose 3, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}

als Prognose 5. Die oben genannten Zusammenhänge finden sich ebenfalls in den Prognosen der zu erwartenden Ausfallwahrscheinlichkeit nach Abbildung 5.24. Die extrem konservative Prognose der 99,85- und 97,75-Quantile findet sich in hohen Ausfallwahrscheinlichkeiten wieder (Beanspruchungsfolge A, E und F). Diese Prognosen sind so hoch (prognostizierte Ausfallwahrscheinlichkeiten von 50 bis 50 %), dass ein Betreiber eine entsprechende Einheit sofort anhalten sollte, wenn die Aussagen dieser Prognosen als Kenngröße des Ausfallverhaltens dienen. Bei der Beanspruchungsfolge D konvergiert das 84-Quantil am schnellsten mit $F_{N_{\text{Soll}}}$, während das 99,85-Quantil die größten Abweichungen aufweist. Dies widerspricht dem Zusammenhang zwischen Quantilhöhe und Konvergenzverhalten bei der Prognose der maximalen Nutzungsdauer.

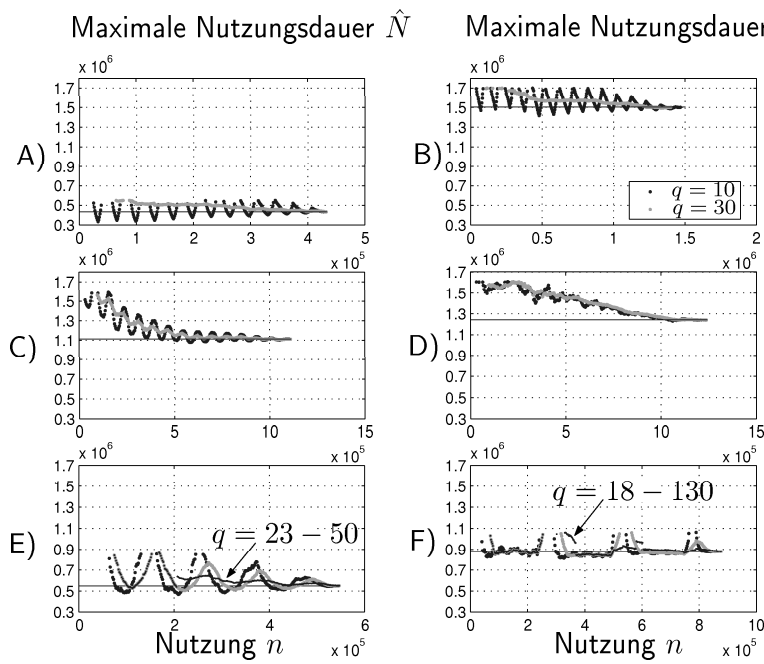


Abbildung 5.21: Ergebnisse der Prognose 4, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}

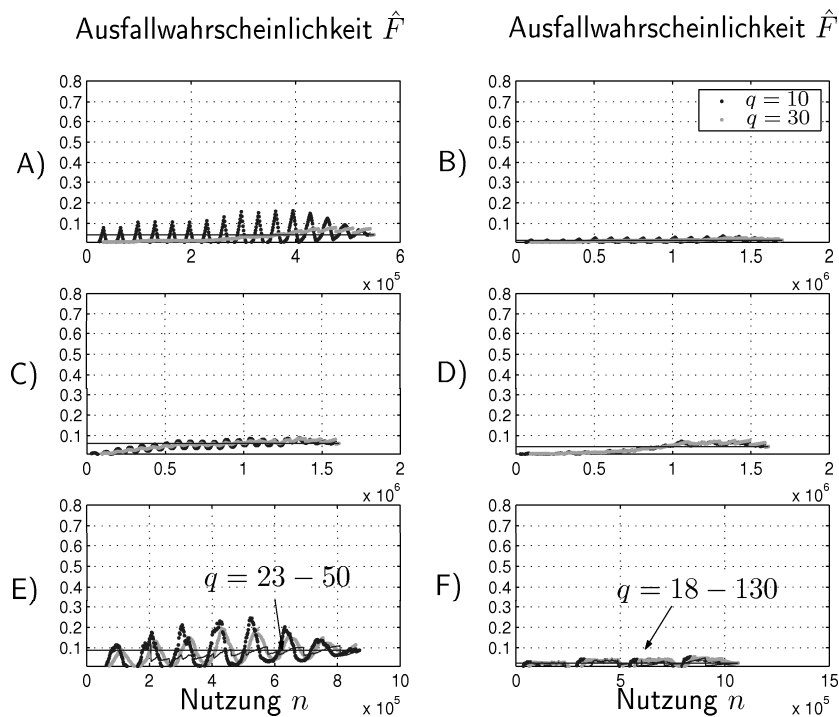


Abbildung 5.22: Ergebnisse der Prognose 4, Ausfallwahrscheinlichkeit beim Erreichen von N_{Soll}

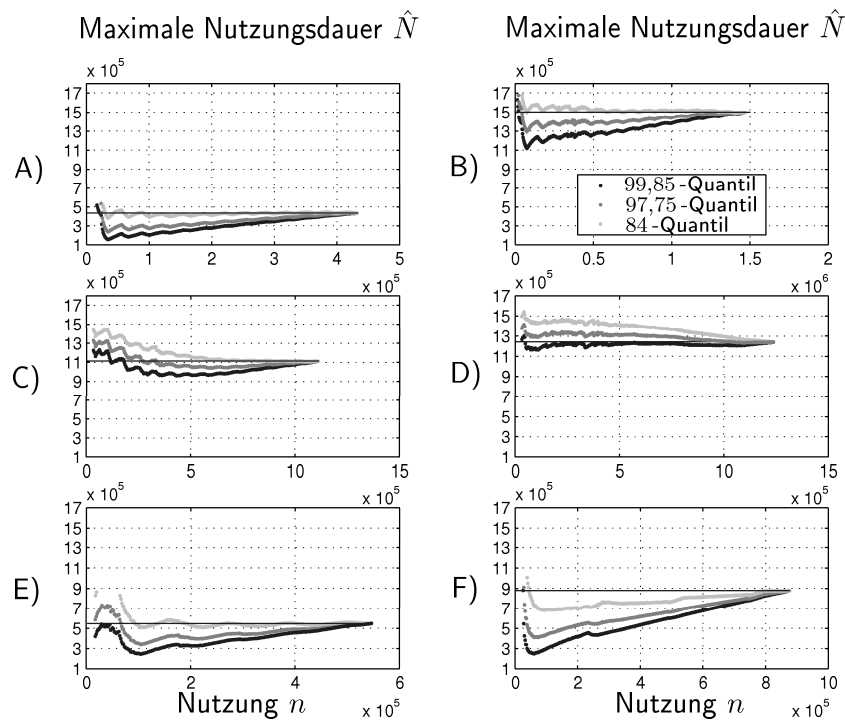


Abbildung 5.23: Ergebnisse der Prognose 5, maximale Nutzungsdauer beim Erreichen von F_{krit}

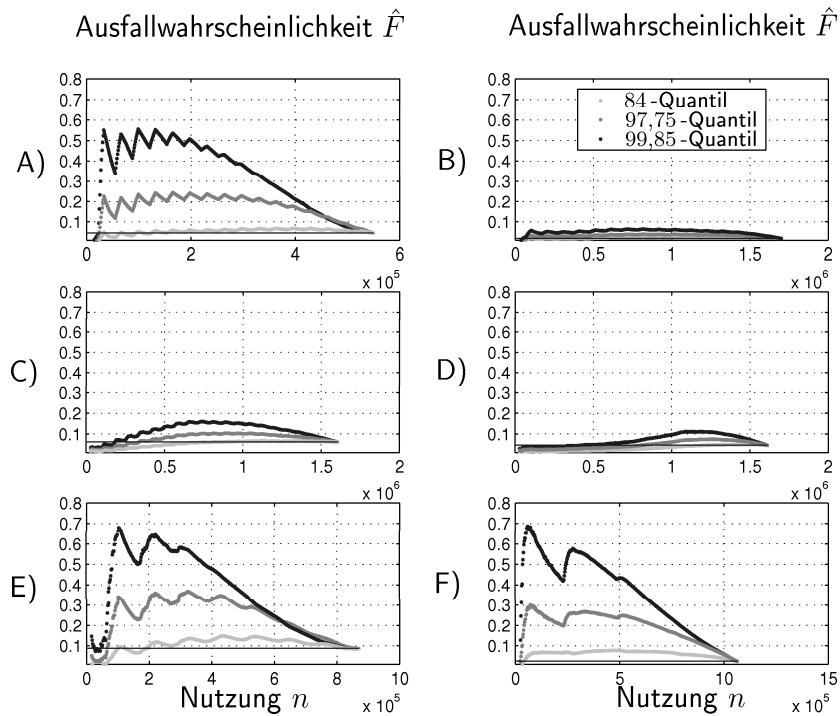


Abbildung 5.24: Ergebnisse der Prognose 5, Ausfallwahrscheinlichkeit beim Erreichen von N_{Soll}

Beanspruchungslimitierung

Um die maximale Soll-Nutzungsdauer zu erreichen, wurde für die driftbehafteten Beanspruchungsverläufe eine Limitierung der Maximalbeanspruchung nach der Methode aus Abschnitt 5.1.3 durchgeführt. Eine Begrenzung der Beanspruchungen auf Basis der modellbasierten prädiktiven Regelung und der Extremtrajektorie, wie in den Abbildungen 5.9 und 5.10 vorgestellt, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt.

Die Begrenzung erfolgt in der Simulation immer dann, wenn

- I) die Prognose eine maximale Nutzungsdauer $\hat{N} < N_{\text{Soll}}$ vorhersagt oder
- II) die Prognose eine Ausfallwahrscheinlichkeit $\hat{F} > F_{\text{krit}}$ vorhersagt.

Für die einzelnen Beanspruchungsverläufe wurden an Hand der Ergebnisse des vorhergehenden Abschnitts die Prognosevarianten nach Tabelle 5.5 gewählt.

Tabelle 5.5: *Gewählte Prognosevarianten*

Beanspruchungsverlauf	Begrenzungsfall I Prognosevariante	Begrenzungsfall II Prognosevariante
A	5 (84-Quantil)	5 (84-Quantil)
B	5 (84-Quantil)	5 (84-Quantil)
C	5 (97,75-Quantil)	5 (84-Quantil)
D	5 (99,85-Quantil)	5 (84-Quantil)
E	5 (84-Quantil)	4 ($q = \text{Periodizität}$)
F	4 ($q = \text{Periodizität}$)	4 ($q = \text{Periodizität}$)

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.25 bis 5.30 dargestellt. Die Abbildungen bestehen aus jeweils vier übereinander angeordneten Diagrammen. Das oberste Diagramm zeigt den Unterschied zwischen dem Beanspruchungsverlauf mit Driftverhalten und dem Beanspruchungsverlauf mit Begrenzung der Beanspruchungshöhen für den Begrenzungsfall I. An diesem Diagramm kann erkannt werden, wann und wie hoch eine Beanspruchungsbegrenzung erfolgt. Im darunter befindlichen Diagramm wird der gleiche Zusammenhang für den Begrenzungsfall II dargestellt. Das Diagramm unter den beiden Beanspruchungsverläufen zeigt die Entwicklung der Ausfallwahrscheinlichkeit F_i über die Nutzungen n_i . Die drei Kurven stellen die Ausfallwahrscheinlichkeiten für den unbegrenzten Fall und die beiden Begrenzungsfälle I und II dar. Hierbei lässt sich erkennen, ob und wann die kritische Ausfallwahrscheinlichkeit F_{krit} , die ebenfalls eingetragen ist, erreicht wird. Somit kann mittels des dritten Diagramms die Einhaltung der Zielbedingungen

$$\begin{aligned} F_{N_{\text{Soll}}} &\leq F_{\text{krit}} \quad \text{und} \\ N_{F_{\text{krit}}} &\geq N_{\text{Soll}} \end{aligned} \tag{5.26}$$

nachgewiesen werden. Im untersten Diagramm ist die Differenz zwischen den Ausfallwahrscheinlichkeiten in den Begrenzungsfällen I und II abgebildet. Dies entspricht

dem Abstand der schwarzen zur mittelgrauen Kurve aus dem darüberliegenden Diagramm und verdeutlicht somit den Unterschied der beiden Begrenzungsfälle zueinander.

Die Minimalbeanspruchung B_{\min} musste von 270 MPa auf 250 MPa gesenkt werden, um eine Konvergenz des Verfahrens zur Bestimmung von B_L zu ermöglichen. Für den Begrenzungsfall I und die Beanspruchungsverläufe A, B, C und E sowie für den Begrenzungsfall II und dem Beanspruchungsverlauf E wurde trotz dieser Reduzierung von B_{\min} keine Konvergenz des Verfahrens für Nutzungen nahe der maximalen Nutzungsdauer N_{Soll} und den Nebenbedingungen

$$B_L \in [B_{\min}, \dots, B_{\max}]$$

erreicht. Da die Minimalbeanspruchung nicht noch weiter reduziert werden sollte, wurden weniger als N_{Soll} Nutzungen simuliert.

An den Abbildungen lässt sich erkennen, dass die vorübergehende Limitierung von B_i die Beanspruchungsspitzen in den Beanspruchungs-Zeit-Verläufen weitestgehend vermeidet. Je früher und intensiver das Driftverhalten im Beanspruchungs-Zeit-Verlauf ausgeprägt ist (vergleiche Abbildung 5.14), desto früher setzt die Beanspruchungsbegrenzung ein. Dies ist besonders deutlich an den Beanspruchungsverläufen C und D in den Abbildungen 5.27 und 5.28 zu erkennen. Bei den Begrenzungen der Beanspruchungsverläufe A, B, C und D nach Prognose 5 (Abbildungen 5.25, 5.26, 5.27 und 5.28) zeigt sich, dass der Begrenzungsfall II im Gegensatz zum Fall I im späteren Verlauf wieder höhere Beanspruchungsniveaus zulässt. Bei dem Beanspruchungsverlauf E tritt dieser Trend gegenläufig auf. Der Begrenzungsfall I in Abbildung 5.29 lässt zum Ende der Nutzung mehr höhere Beanspruchungen zu. Bei Beanspruchungsverlauf F ist dieser Trend gar nicht erkennbar (Abbildung 5.30). Ursache hierfür ist das oben erwähnte Konvergenzproblem des Algorithmus zur Bestimmung von B_L .

In allen Fällen werden die vorgegebenen Ziele (5.26) erreicht. Beim Begrenzungsfall I in Abbildung 5.26 wird die maximale Nutzungsdauer überschritten. Dies bedeutet, dass die Begrenzung der Beanspruchungen häufiger oder intensiver als notwendig war. Da eine Begrenzung der Beanspruchung zumeist mit einer Reduzierung der Leistung der zugehörigen Einheit verbunden ist, wäre die Begrenzung nach Begrenzungsfall I aus ökonomischer Sicht nicht zweckmäßig. Aus sicherheitstechnischer Sicht hingegen würde eine maximale Nutzungsdauer $N > N_{\text{Soll}}$ durchaus sinnvoll sein, da $(N - N_{\text{Soll}}) / N_{\text{Soll}}$ als Sicherheitsfaktor bzgl. der maximalen Nutzungsdauer gesehen werden kann. Es muss jedoch immer die jeweils geforderte Funktionalität der Einheit gewährleistet sein.

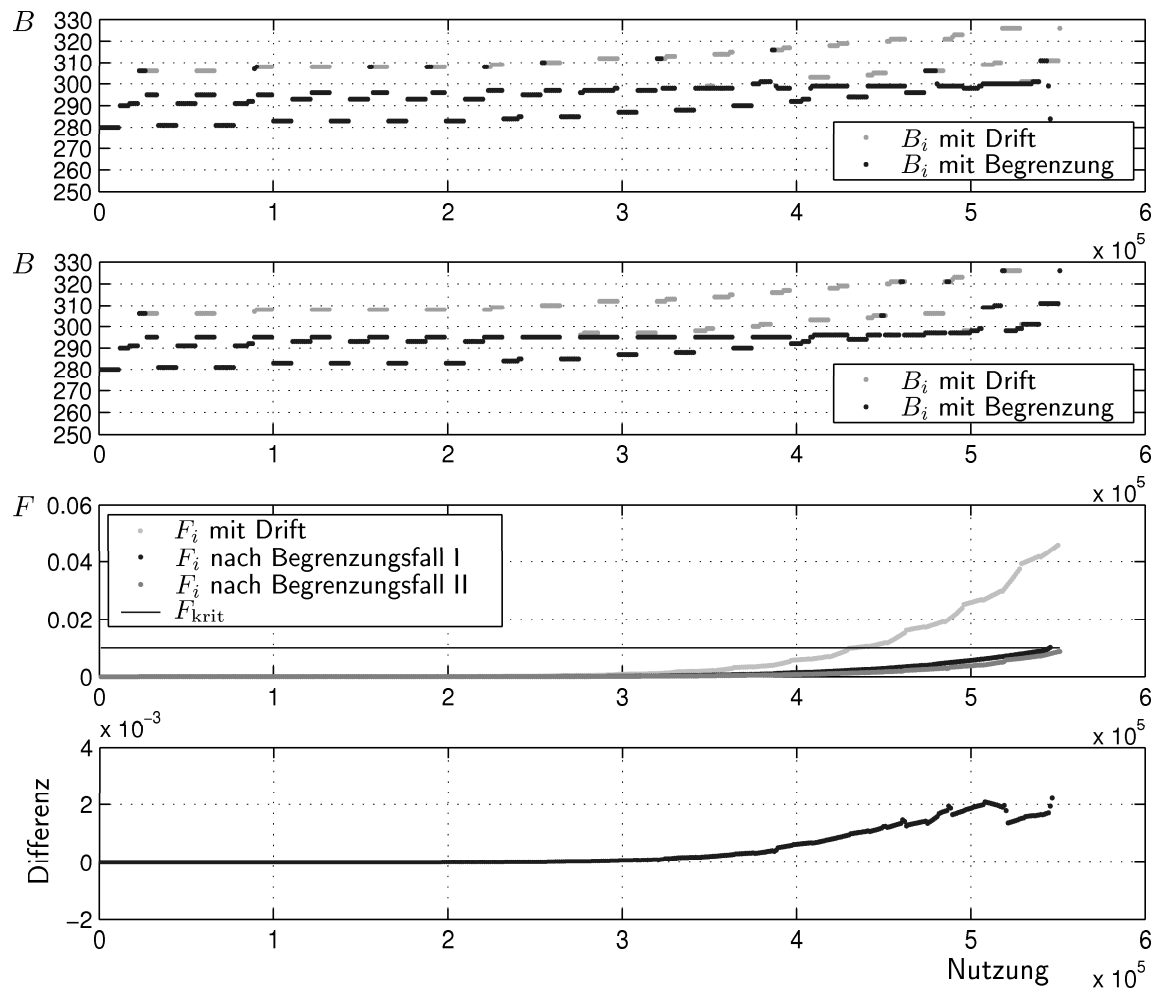


Abbildung 5.25: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf A nach Begrenzungsfall I und II

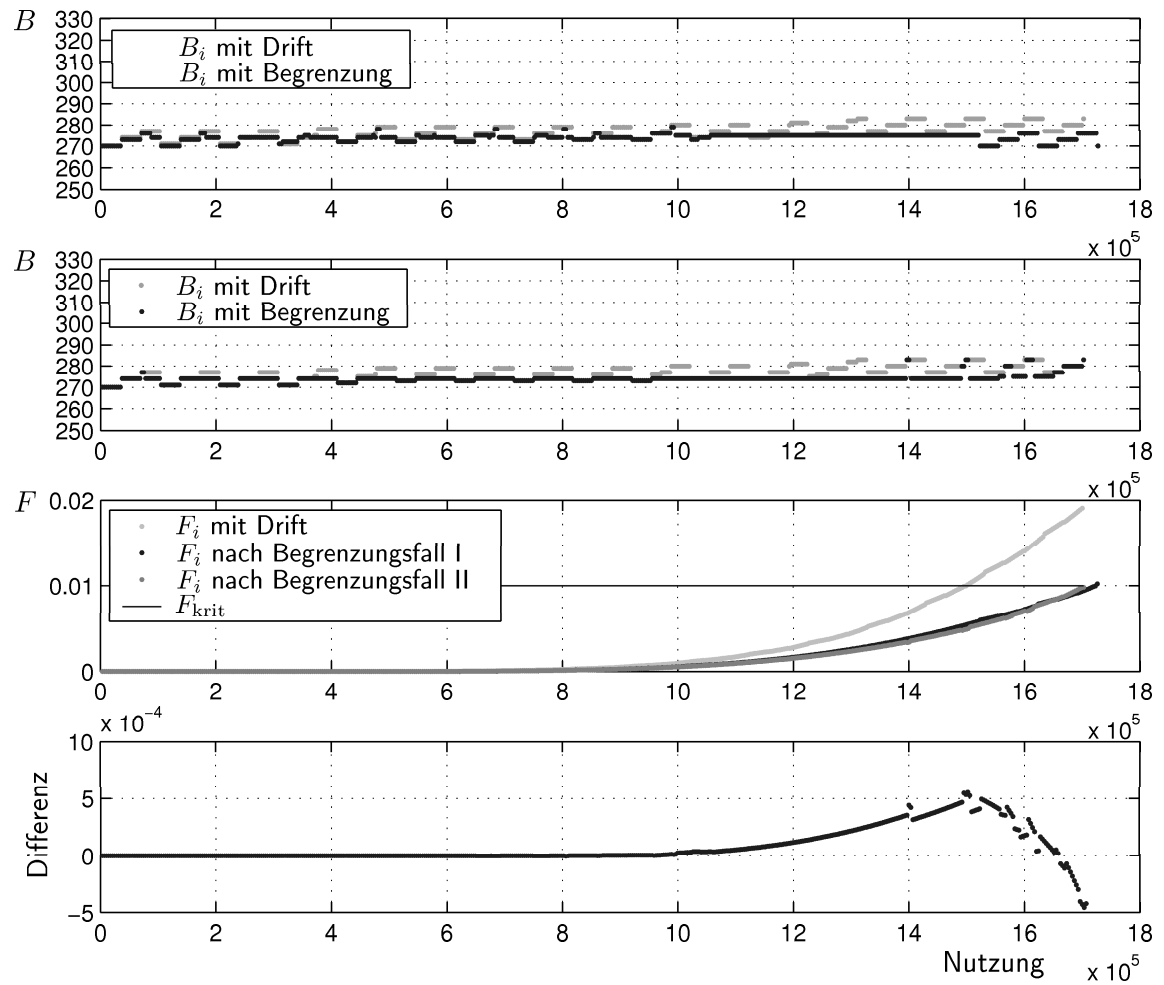


Abbildung 5.26: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf B nach Begrenzungsfall I und II

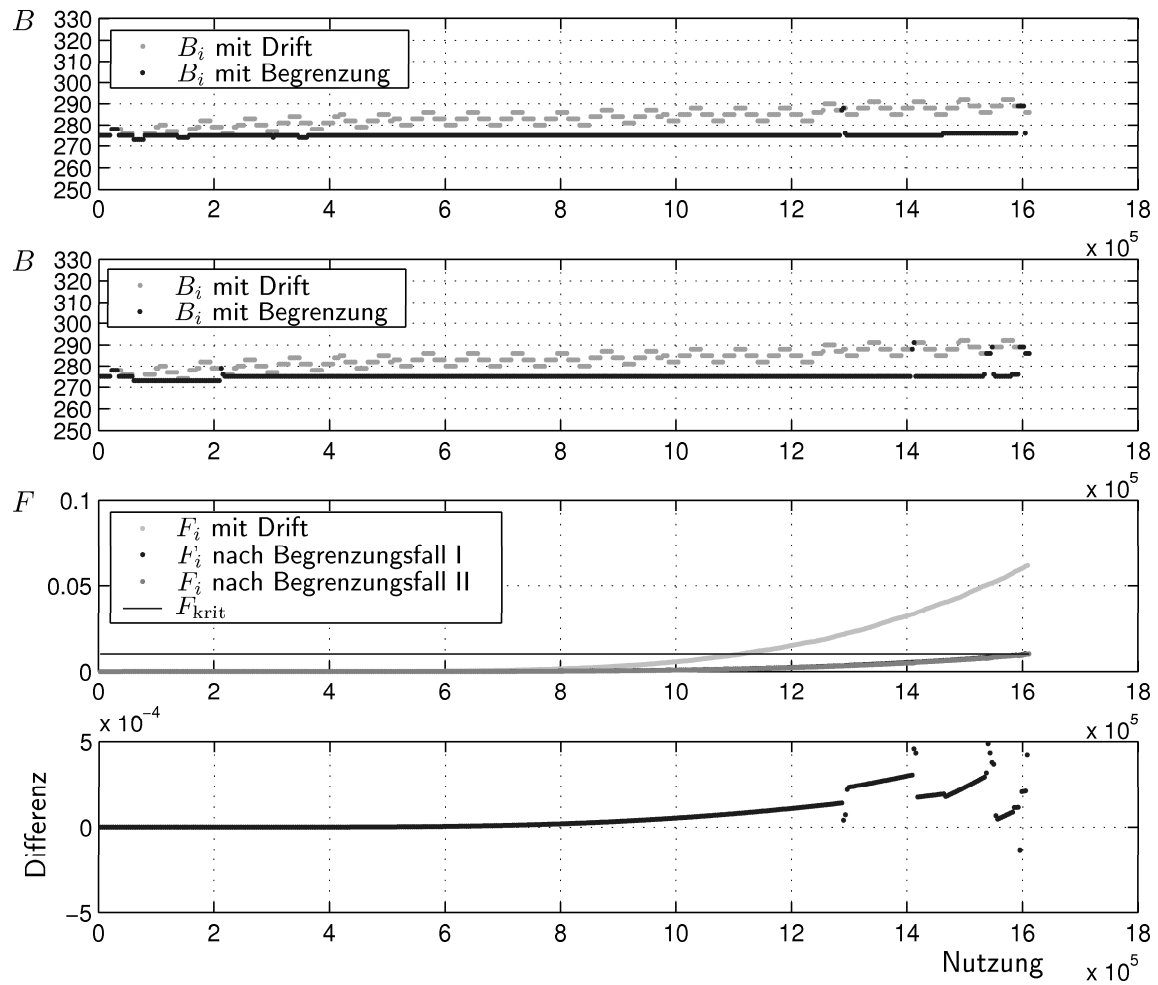


Abbildung 5.27: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf C nach Begrenzungsfall I und II

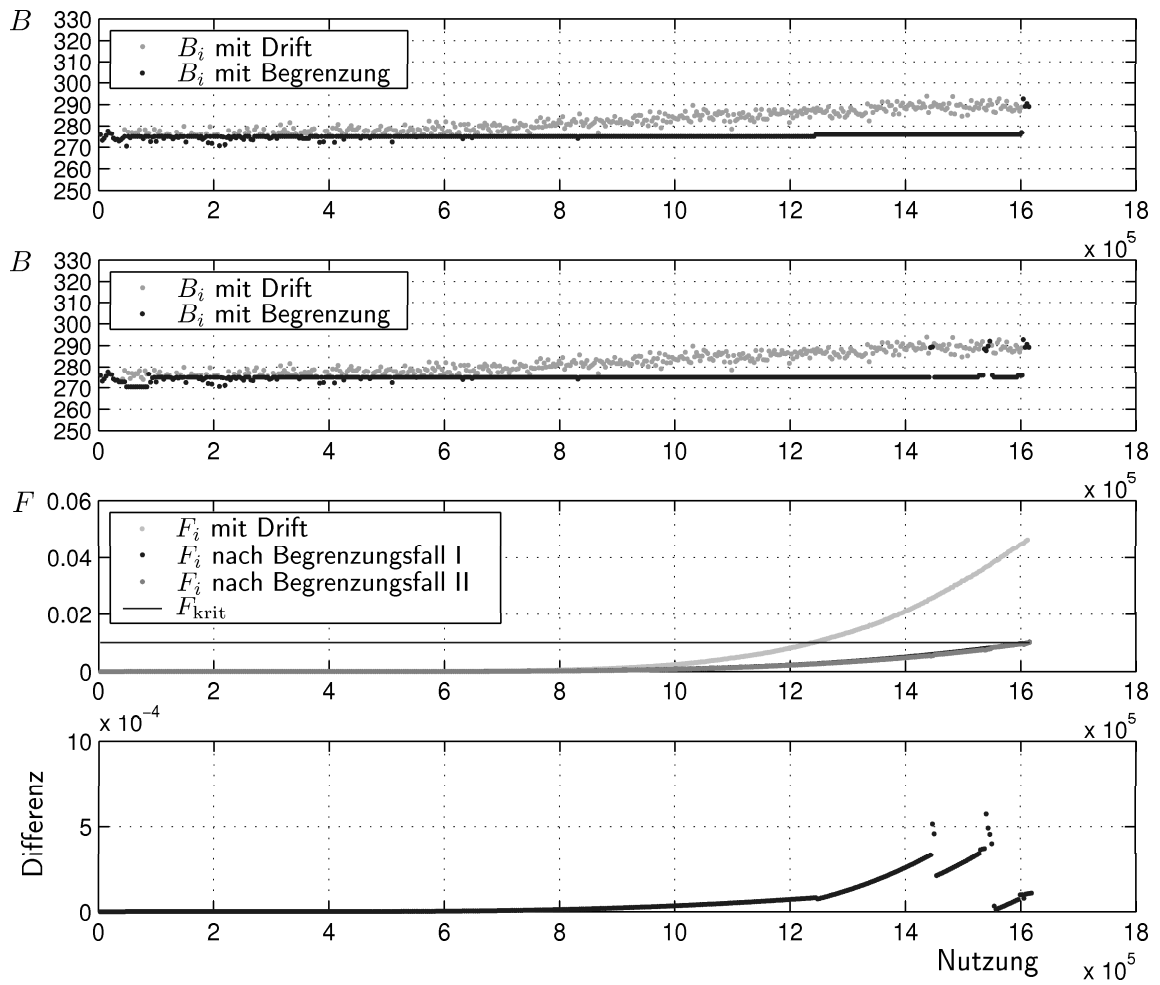


Abbildung 5.28: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf D nach Begrenzungsfall I und II

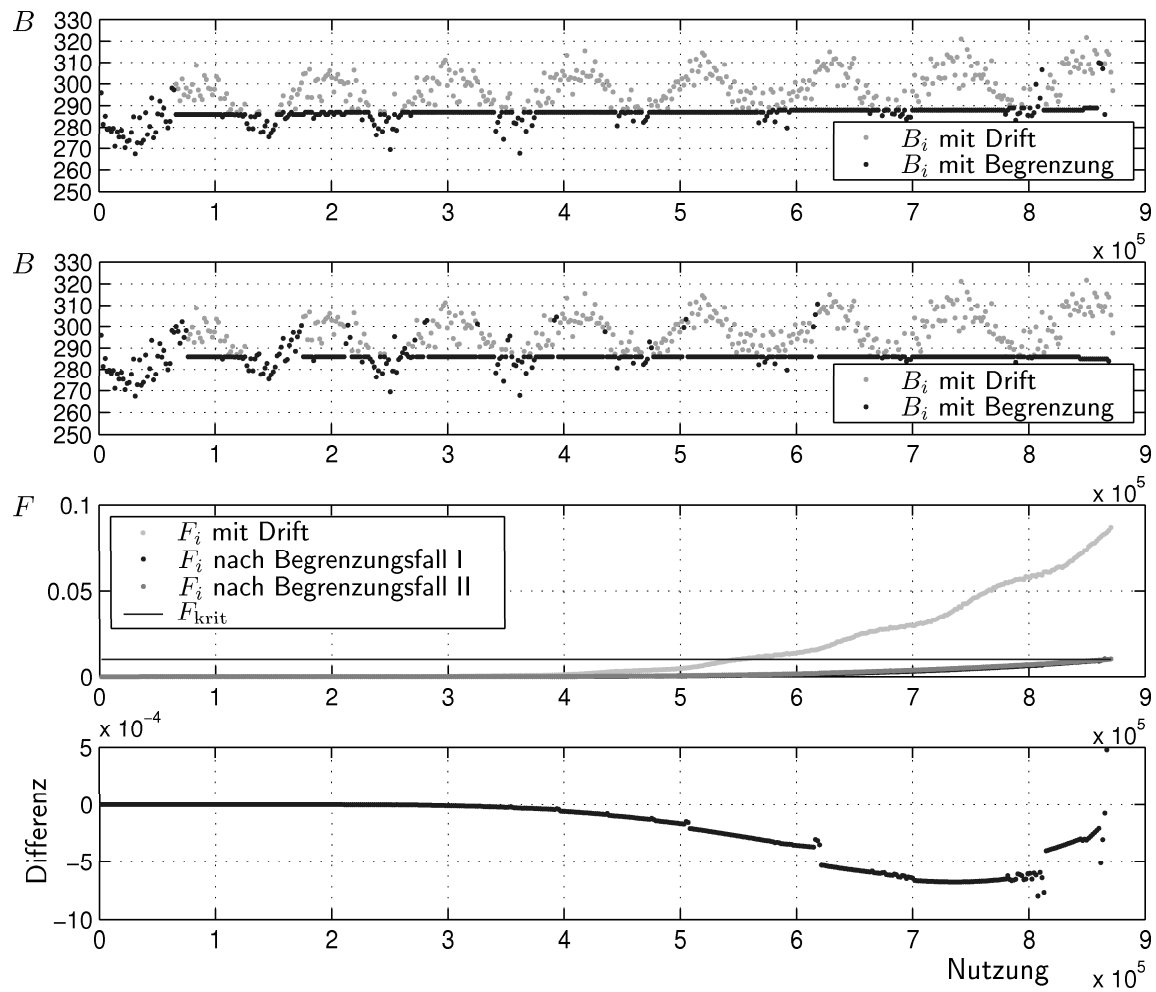


Abbildung 5.29: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf E nach Begrenzungsfall I und II

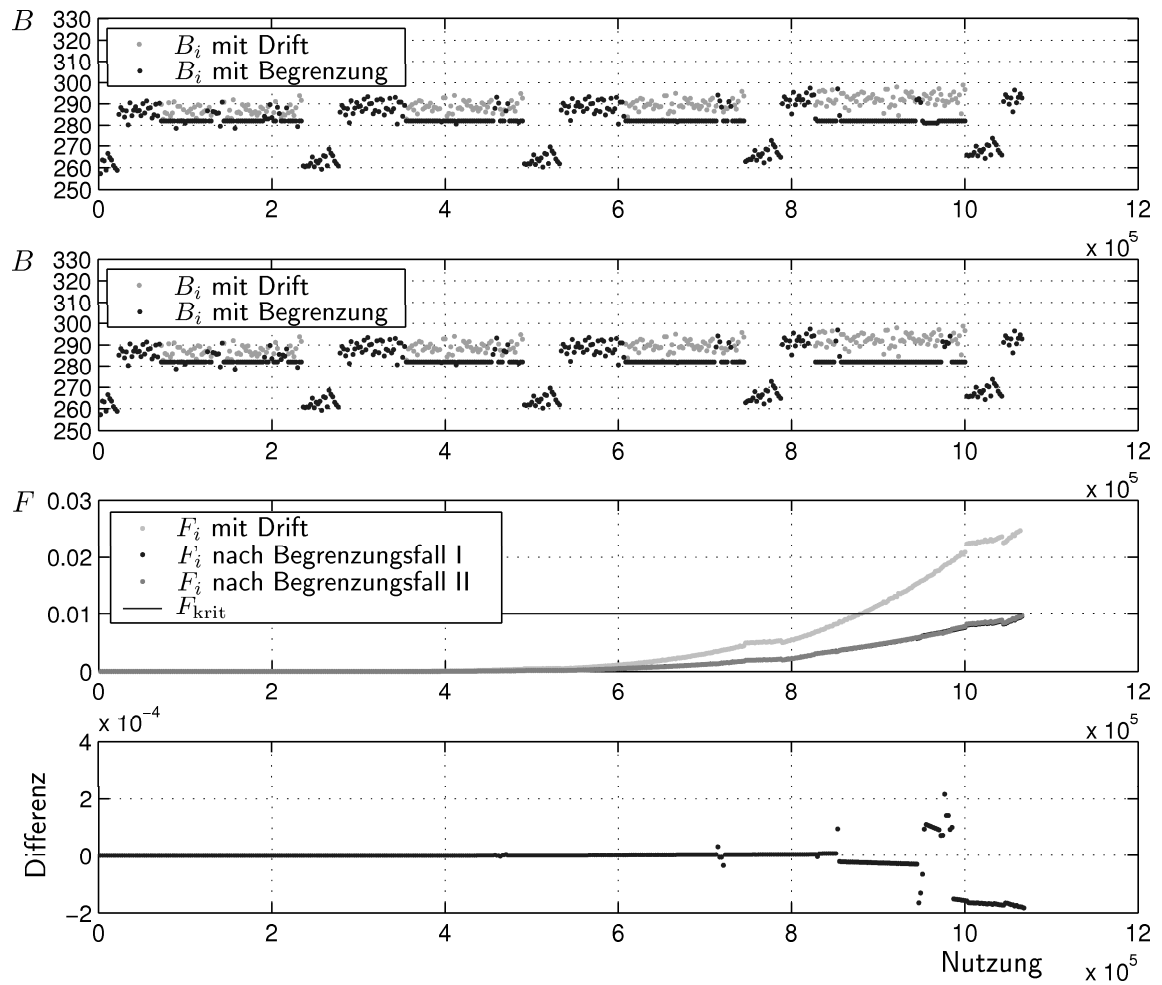


Abbildung 5.30: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf F nach Begrenzungsfall I und II

Die Differenz der Ausfallwahrscheinlichkeiten zwischen beiden Begrenzungsfällen liegt für die Beanspruchungsverläufe B, C, D, E und F im Bereich kleiner 1 Promille. Beim Beanspruchungsverlauf A beträgt die Differenz bis zu 0,2 %. Da die Werte der kritischen Ausfallwahrscheinlichkeit üblicherweise sehr klein gewählt werden, ist die Abweichung im Beanspruchungsverlauf A nicht zu vernachlässigen. Bei einer konkreten Anwendung müsste daher genau abgewogen werden, welche der Begrenzungsfälle eingesetzt werden. Im Zweifelsfall würde der konservativeren Begrenzung nach Fall II der Vorrang zu geben sein. Bei allen Beanspruchungsverläufen weichen beide Begrenzungsfälle erst in der letzten Hälfte der Gesamtnutzungsdauer voneinander ab.

Die Art und Weise, wie oft und intensiv die Beanspruchungen begrenzt werden, hängt sehr stark von der zu Grunde liegenden Prognoseart und den Annahmen und Verfahren zur Bestimmung der Grenzbeanspruchung B_L ab. Eine Anwendung der Prognosevarianten und Begrenzungsfälle nach Tabelle 5.5 auf die Beanspruchungs-Zeit-Verläufe ohne Driftverhalten zeigt, wie genau die Aussagen gewertet werden können. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.31 bis 5.36 auf Seite 113 bis 118 dargestellt. Das jeweils obere Diagramm zeigt einen Vergleich zwischen dem unbegrenzten Beanspruchungs-Zeit-Verlauf und dem Verlauf nach Begrenzungsfall I. Das mittlere Diagramm stellt den gleichen Sachverhalt für den Begrenzungsfall II dar. Im unteren Diagramm ist ein Vergleich der Entwicklung der Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Beanspruchungs-Zeit-Verläufe des unbegrenzten Verlaufs, des Begrenzungsfalls I und des Begrenzungsfalls II abgebildet. Die Soll-Nutzungsdauer ist als gepunktstrichelte Linie eingetragen.

In allen sechs Abbildungen ist zu erkennen, dass eine Begrenzung der Beanspruchung stattfindet. Da die Zielbedingungen (5.26) allerdings auch ohne Begrenzung der Beanspruchungen erreicht werden (siehe Abbildung 5.13), ist die Schlussfolgerung zu treffen, dass die Methoden und Verfahren zur Prognose der maximalen Nutzungsdauer \hat{N} und der Ausfallwahrscheinlichkeit \hat{F} sowie zur Bestimmung der maximalen Beanspruchung B_L nicht ausreichend genau sind. In den meisten Fällen (Beanspruchungsfolgen A, B, C und F) wird die Beanspruchung beim Beanspruchungsfall II häufiger begrenzt. Da im Begrenzungsfall I dementsprechend weniger Limitierungen der Beanspruchungen erfolgen, beschreibt die Ausfallwahrscheinlichkeit nach Begrenzungsfall I einen Verlauf, der näher an dem Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit der unbegrenzten Beanspruchung liegt. Beim Verlauf C ist der Unterschied in der Anzahl der Begrenzungen so gering, dass die Abweichung zwischen der Ausfallwahrscheinlichkeit nach den Begrenzungsfällen I und II vernachlässigt werden kann. Bei den Verläufen D und E (Abbildungen 5.34 und 5.35) verhält es sich genau umgekehrt. In diesen beiden Fällen ist die Zahl der Begrenzung beim Beanspruchungsfall II geringer und dementsprechend liegt die Kurve der Ausfallwahrscheinlichkeit von Beanspruchungsfall II näher an der Kurve der Ausfallwahrscheinlichkeit der unbegrenzten Beanspruchung. Eine Ursache könnte in der größeren Streuung der real zu erwartenden Nutzungsdauer N im Vergleich zu den Beanspruchungsfolgen A, B, C und F liegen (vergleiche Abbildung 5.13). Wie in Abbildung 5.35 für die Beanspruchungsfolge E zu erkennen ist, resultiert der gewählte Beanspruchungsverlauf in eine Nutzungsdauer, die größer ausfällt als der Mittelwert

der Nutzungsdauern \bar{N}_{Soll} für die Beanspruchungsfolge E. Dies unterstreicht den stochastischen Charakter der Beanspruchungsfolge.

Ist die Differenz $N_{\text{Soll}} - N_{F_{\text{krit}}}$ zwischen der Soll-Nutzungsdauer und der Nutzungsdauer beim Erreichen der kritischen Zuverlässigkeitskenngröße besonders groß, wie es bei den Beanspruchungsfällen A und B der Fall ist, so wird die Beanspruchung beim Beanspruchungsfall II häufiger begrenzt (vergleiche oberes und mittleres Diagramm in den Abbildungen 5.31 und 5.32). Da im Begrenzungsfall I dementsprechend weniger Limitierungen der Beanspruchung erfolgen, liegt der Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit nach Begrenzungsfall I im Gegensatz zum Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit nach Begrenzungsfall II näher an dem Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit der unbegrenzten Beanspruchung.

Die Ergebnisse (Abbildungen 5.25 bis 5.30) zeigen, dass die Ansätze zur Prognose der Nutzungspunkte $N_{F_{\text{krit}}}$ und N_{Soll} bzw. der Ausfallwahrscheinlichkeiten F_{krit} und $F_{N_{\text{Soll}}}$ und damit zur Beeinflussung der maximalen Nutzungsdauer N ausreichen. Die Umsetzung des SRCE-Konzepts entsprechend den getroffenen Annahmen kann somit rein rechnerisch als erfolgreich angesehen werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, wie stark diese von den Annahmen der Prognose abhängig sind. Um den Ausfallzeitpunkt exakt vorhersagen zu können, müssen möglichst genaue Annahmen über den weiteren Beanspruchungsverlauf getroffen werden. Der unnötige Eingriff der Beanspruchungslimitierung in den unveränderten Beanspruchungs-Zeit-Verlauf (Abbildungen 5.31 bis 5.36) verdeutlicht, dass die Ansätze und Verfahren noch einer Optimierung bedürfen.

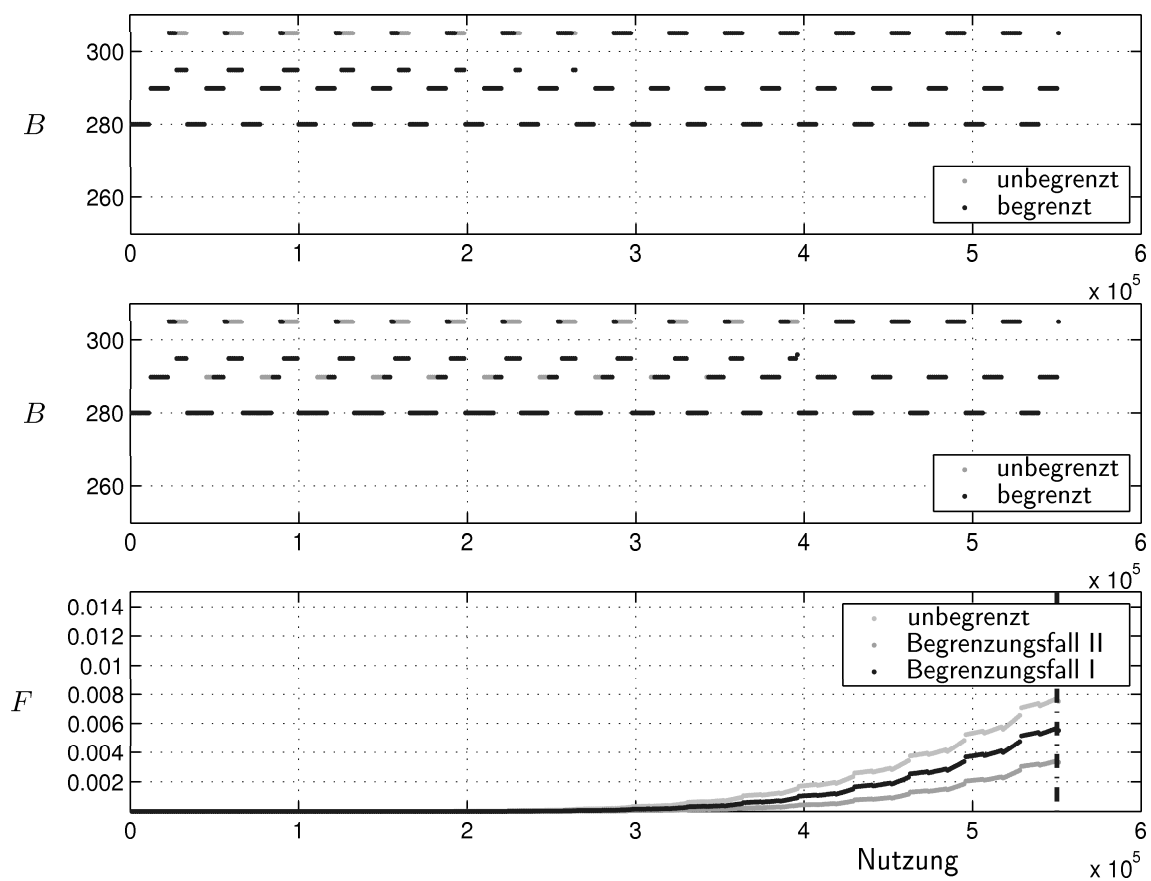


Abbildung 5.31: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf A ohne Driftverhalten

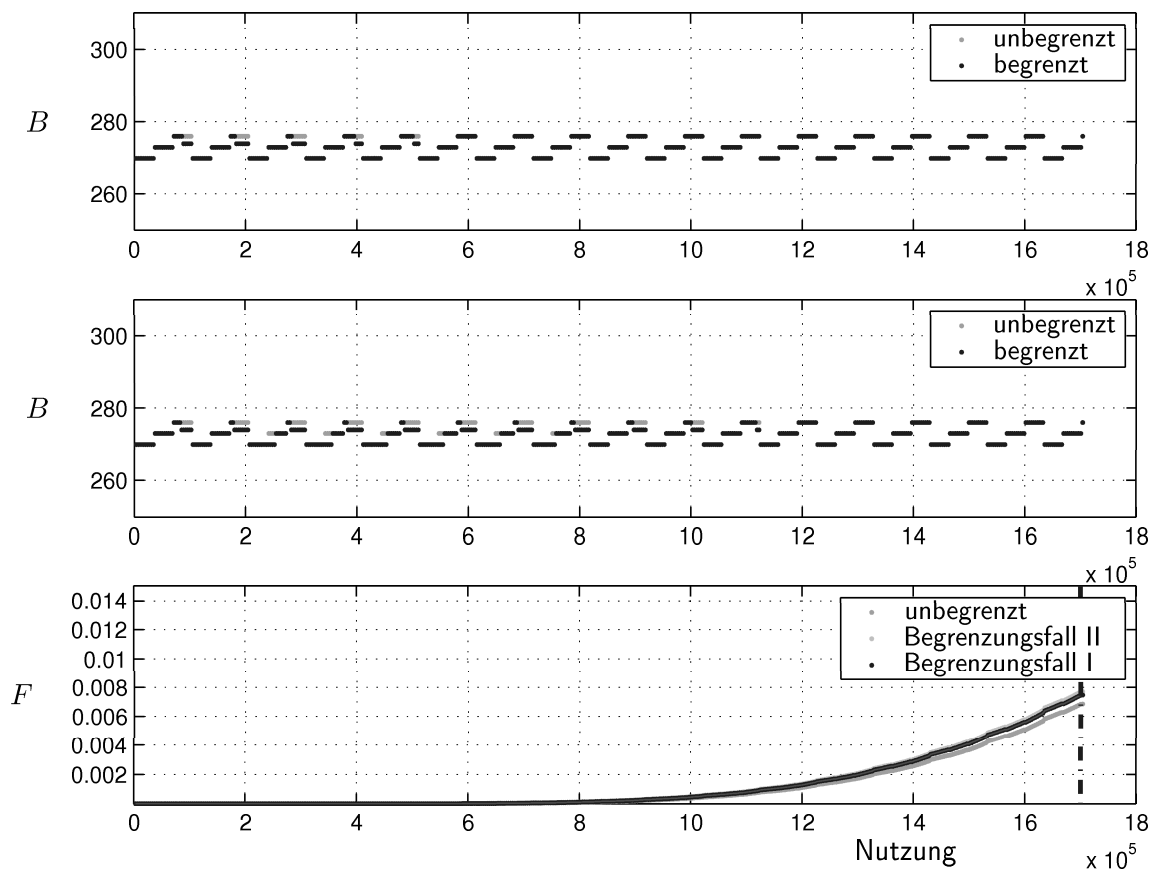


Abbildung 5.32: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf B ohne Driftverhalten

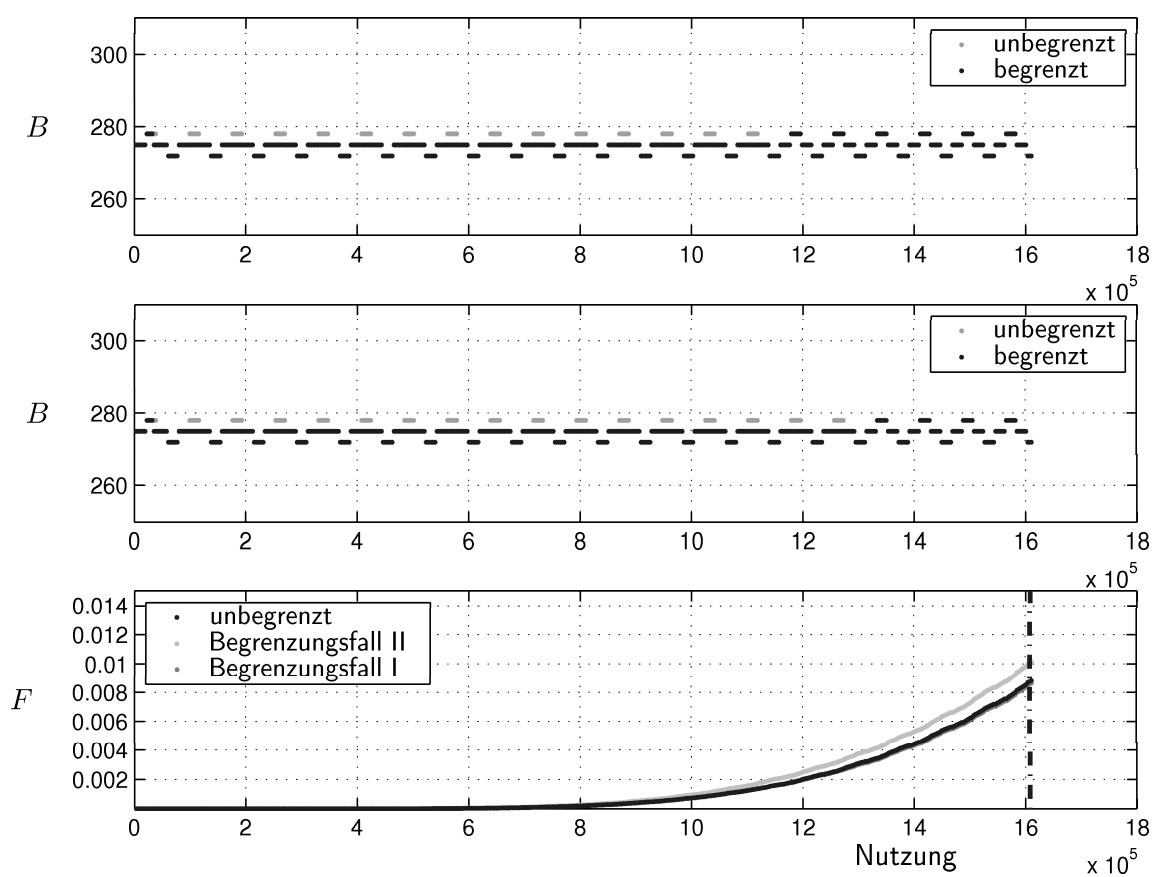


Abbildung 5.33: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf C ohne Driftverhalten

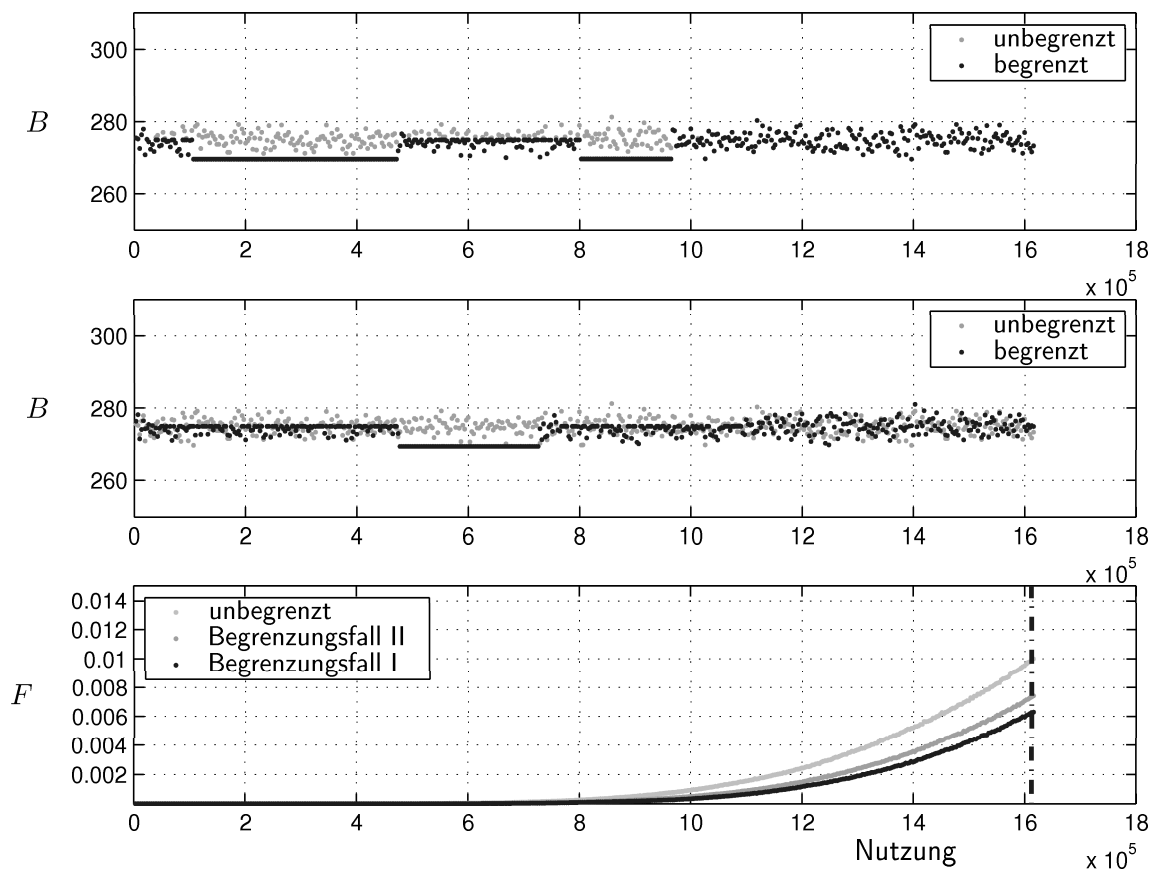


Abbildung 5.34: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf D ohne Driftverhalten

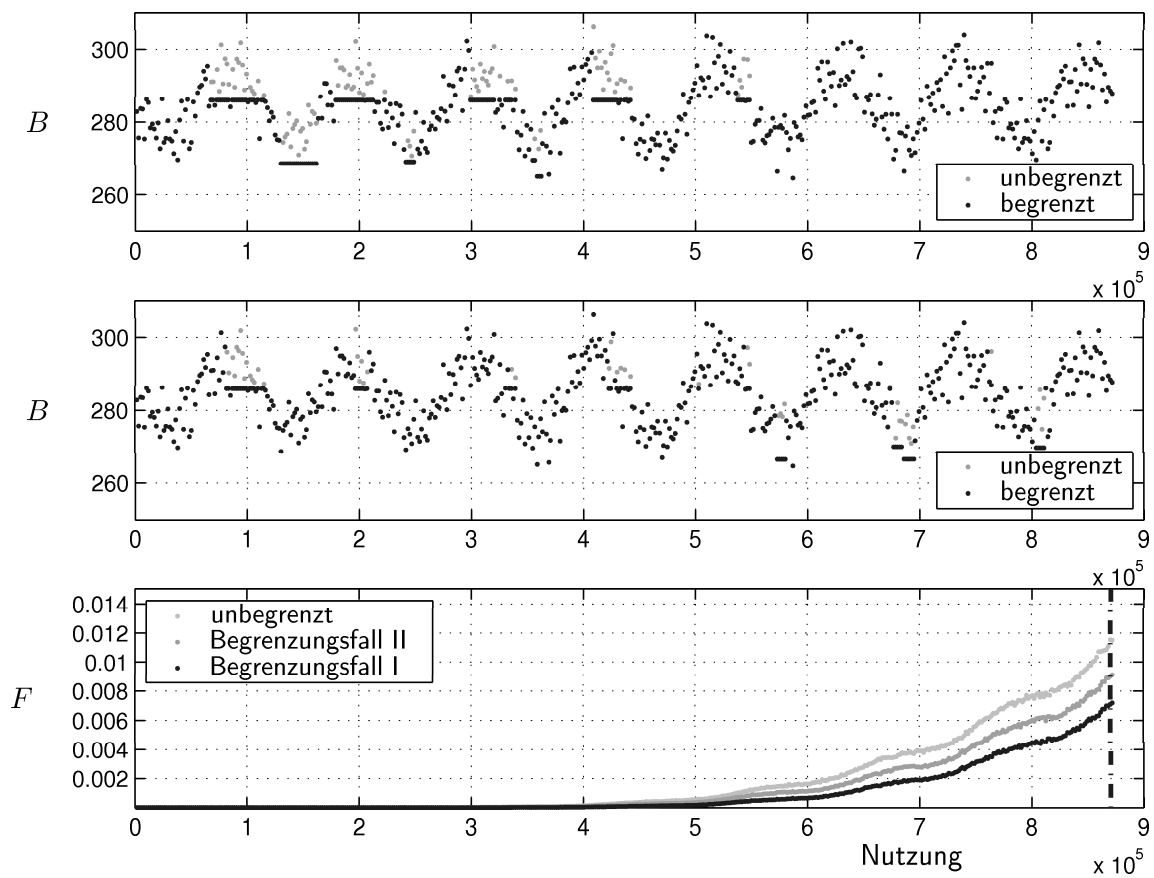


Abbildung 5.35: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf E ohne Driftverhalten

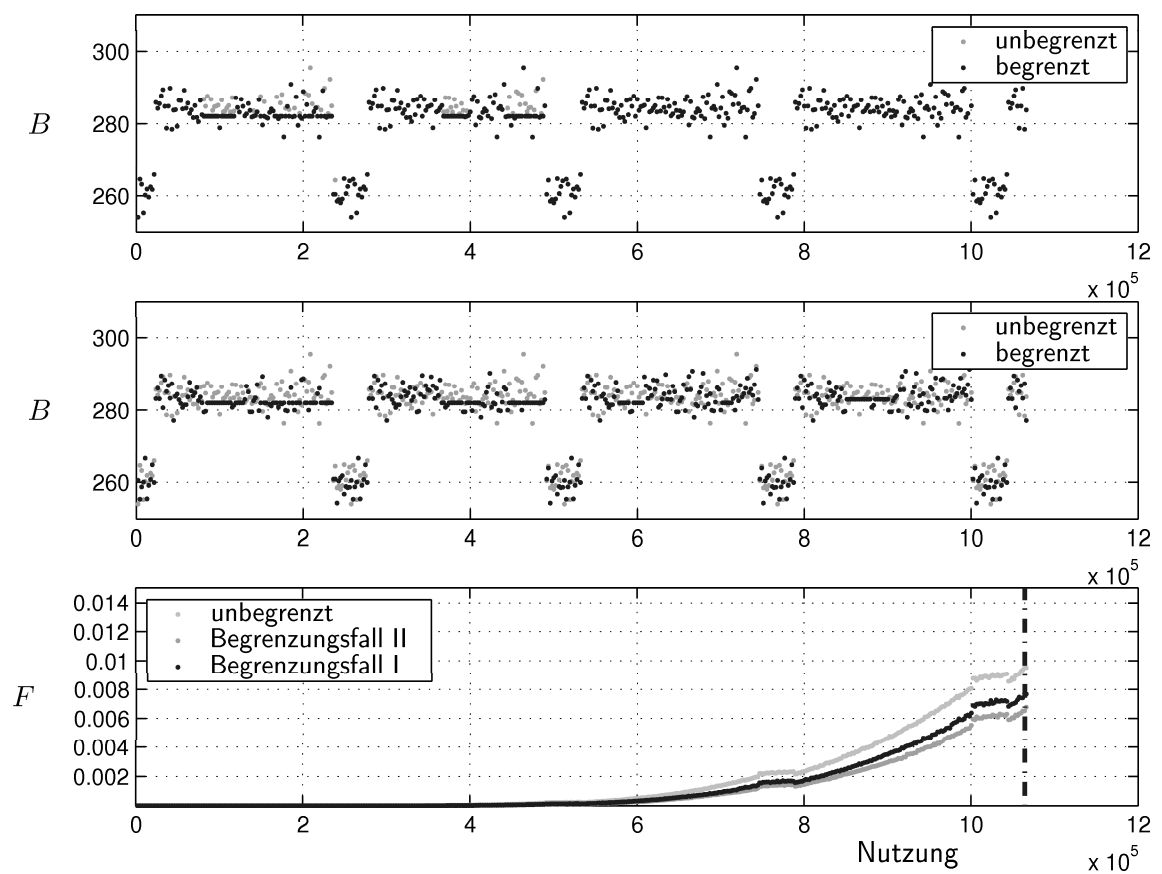


Abbildung 5.36: Ergebnisse der Beanspruchungsbegrenzung für Beanspruchungsverlauf F ohne Driftverhalten

6 Zusammenfassung und Ausblick

Eine quantifizierbare Aussage über den probabilistischen, nutzungsbedingten Ausfallzeitpunkt einer bereits im Betrieb befindlichen Komponente oder eines Systems ist Kern vieler Fragestellungen im Bereich Instandhaltung, Risikobewertung und Asset-Management. Eine diesbezügliche Aussage würde zu einer Reduzierung des Einsatzes organisatorischer und monetärer Mittel zur Aufrechterhaltung oder Erhöhung der Sicherheit und Verfügbarkeit technischer Systeme wesentlich beitragen. Neben dem Wissen über den möglichen Ausfallzeitpunkt ist jedoch auch die Frage nach dem Potenzial zur Verlängerung der Lebensdauer, und damit zum Hinauszögern des Ausfalls einer Einheit von Bedeutung. Dies gilt nicht nur für sicherheitskritische Systeme, bei denen auf diese Weise eine Gefahr für Mensch, Maschine und Umwelt vermindert oder gar vermieden werden kann. Auch unter rein ökonomischen Aspekten kann das Hinauszögern eines nutzungsbedingten Ausfalls von Vorteil sein.

Die vorliegende Arbeit basiert auf [Söffker, 2001a] und konzentriert sich auf die Umsetzung des in [Rakowsky u. Söffker, 1996] vorgestellten Safety and Reliability Control Engineering Konzepts. Dieses Konzept dient der lebensdaueroptimierenden und ausfallvermeidenden Betriebsführung technischer Systeme unter Nutzung des Wissens über den Zusammenhang zwischen der aktuellen sowie der vergangenen Beanspruchung einer Komponente bzw. eines Systems und dem Ausfall der entsprechenden Einheit. Durch eine bewusste Änderung der Beanspruchungen einer Einheit wird der Ausfall dieser hinsichtlich seiner Eintrittswahrscheinlichkeit und seines Eintrittszeitpunkts zielgerecht beeinflusst. Voraussetzungen zur Anwendung dieses Konzepts sind

1. das Vorhandensein einer Lebensdauerkennlinie der Einheit,
2. die Möglichkeit zur Erfassung der ausfallvermeidenden Beanspruchungen,
3. ein analytischer Formalismus zur Beschreibung der nutzungsbedingten Schädigung der Einheit während ihres Einsatzes sowie
4. ein Prognoseverfahren zur Vorhersage des zukünftigen, beanspruchungsabhängigen Ausfallverhaltens.

In den bisherigen Arbeiten wurde die zu bestimmende Zuverlässigkeitskenngröße (Ausfallrate) mit Hilfe von deterministischen Lebensdauerkennlinien bestimmt, wobei zusammengesetzte Beanspruchungen durch Schadensakkumulationshypothesen in eine äquivalente Beanspruchung umgerechnet wurden. Die weitere Beeinflussung des Ausfallverhaltens wurde in den bisherigen Arbeiten nur skizzenhaft angerissen.

In der vorliegenden Arbeit erfolgt eine vollständige analytische Beschreibung der nutzungsbedingten Zuverlässigkeitskenngröße unter Berücksichtigung der stochastischen Zusammenhänge. Hierzu wird ein Interferenzmodell der akkumulierten und kritischen Schädigung eingesetzt. Die Formalismen zur Beeinflussung des probabilistischen Ausfallzeitpunkts werden im Zusammenhang mit unterschiedlichen Prognosen und einer hierauf basierenden Begrenzung der Beanspruchungshöhe aufgestellt.

6.1 Neue wissenschaftliche Erkenntnisse

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt erstmalig eine Erweiterung der bisherigen Ansätze in folgenden Bereichen:

- Die Unabhängigkeit des Konzepts bezüglich der Ausfall- und Beanspruchungsart sowie der Akkumulationsmethode der nutzungsbedingten Schädigungen wird beschrieben.
- Ein Ansatz zur Umsetzung des Konzepts durch Softwareagenten wird erläutert.
- Eine vollständige analytische Beschreibung der Vorgehensweise zur Bestimmung der aktuellen Ausfallwahrscheinlichkeit der Einheit wird gegeben.
- Auftretende stochastische Zusammenhänge innerhalb des Konzepts werden vollständig beschrieben.
- Die notwendigen Eingangsgrößen werden bzgl. ihrer Qualität und Quantität definiert.
- Ansätze zur Beeinflussung des probabilistischen Ausfallzeitpunkts als vorgegebene Zielgröße werden erstellt.
- Eine MATLAB® Simulationsumgebung für das Safety and Reliability Control Engineering Konzept wurde erstellt.

Hierzu wurden numerische Simulationen zu

- der Ermittlung der aktuellen Ausfallwahrscheinlichkeit,
- der zu erwartenden Ausfallwahrscheinlichkeit und maximalen Nutzungsdauer mit unterschiedlichen Prognosevarianten sowie
- der zielgerichteten Beeinflussung dieser Größen

durchgeführt. Weiterhin wurde das Potenzial des Konzepts im Rahmen von Ausfall-, Risiko- und funktionaler Assetbewertung technischer Systeme erläutert und durch quantifizierte Simulationsergebnisse veranschaulicht sowie die Möglichkeiten und Grenzen des Konzepts bezogen auf die Beeinflussung der gewählten Zielgrößen *Ausfallwahrscheinlichkeit* und *Nutzungsdauer* aufgezeigt. Die Simulationsergebnisse zeigen, wie die aktuelle Ausfallwahrscheinlichkeit einer definierten Einheit unter verschiedenen Nutzungsbedingungen bestimmt werden kann und wie stark diese Kenngröße von der Art der Nutzungen respektive der Höhe der Beanspruchungen abhängt. Im Sinne eines *Condition Monitoring* liefert diese Kenngröße bereits eine Aussage über das aktuelle Ausfallverhalten einer Einheit. Die Integration einer solchen Zuverlässigkeitskenngröße in entsprechende Monitoringsysteme würde die (zumeist dem Menschen überlassene) Beurteilung der üblichen angezeigten physikalischen Zustandsgrößen, im Bezug auf das Ausfallverhalten wesentlich erleichtern.

Die weiteren Ergebnisse bezüglich der ausfallvermeidenden Betriebsführung zeigen sehr deutlich, welches Potenzial in dem Konzept enthalten ist. Die in ihrer Dauer

und Höhe bewusste Reduzierung der zukünftigen Beanspruchungen ermöglicht, unter Voraussetzung realistischer Prognosen, einen optimalen Ansatz zum Erreichen eines vorgegebenen Ausfallzeitpunkts. Sind auf Grund stark schwankender Betriebsweisen oder anderer Effekte keine realistischen Prognosen möglich, so ist eine erste quantifizierbare Abschätzung der Auswirkungen eines sowohl ansteigenden als auch fallenden weiteren Beanspruchungsverlaufs möglich.

Diese Arbeit stellt somit einen weiteren Schritt hin zu einem denkbaren zukünftigen Lebensdauermonitoring und -optimierungssystem technischer Einheiten dar.

6.2 Mögliche weiterführende Forschungsansätze

Die Vorstellung des Konzepts in Kapitel 4 und die Simulationsergebnisse aus Kapitel 5 zeigen bereits, welches Potenzial in der Anwendung des Safety and Reliability Control Engineering Konzepts im Rahmen der Ausfallüberwachung und Lebensdaueroptimierung technischer Einheiten liegt. Es sind jedoch noch einige Fragestellungen und Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Konzept ungelöst und bedürfen weiterer Forschungsarbeit.

Die Eingangsgrößen des Konzepts sind entscheidend bezüglich der Qualität der Ergebnisse der angewendeten Verfahren. Sowohl das Lebensdauermodell als auch die Schadensakkumulationshypothese der zu betrachtenden Einheit müssen bekannt sein. Da dies nicht immer der Fall ist und zeit- und kostenaufwendige Versuchsreihen zur Ermittlung dieser Modelle meist nicht möglich sind, muss geklärt werden, wie die Generierung solcher Modelle in der Optimierungsphase des Konzepts auszusehen hat. Erste Ansätze hierzu werden bereits in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Hierbei werden die Ergebnisse unterschiedlicher, aus der Literatur bekannter Modelle mit Felddatensätzen verglichen. Im Optimalfall beschreibt eines der Modelle das reale Schädigungsverhalten der Einheit. Ist dies nicht der Fall, stellt sich die Frage, wie durch den Softwareagenten eigenständige Modelle zur Repräsentation des Schädigungsverhaltens adaptiv auf Basis existierender Modelle oder durch neu erlernte Modelle generiert werden können. Als Stichwort sei in diesem Zusammenhang der Begriff des Maschinellen Lernens genannt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde angenommen, dass die quantitative Erfassung der Beanspruchungen mit Verfahren und Methoden der signal- und modellbasierten technischen Diagnose erfolgt. Für komplexere Beanspruchungen und Systeme gilt es zu prüfen, ob diese Verfahren und Methoden ausreichen. In einem solchen Fall müssen gegebenenfalls relevante Merkmale entwickelt werden, welche die Beanspruchungen in ihrer Höhe wiedergeben können, evtl. aber keinen physikalischen Bezug zu ihnen besitzen. Als Beispiel sei die Möglichkeit des Einsatzes von fuzzyfizierten oder qualitativen Merkmalen genannt. Ein Ansatz zur Detektion von Fehlern in hydraulischen Ventilen mit entsprechend mehrdimensionalen Merkmalen ist beispielsweise in [Özbek u. Söffker, 2006] gegeben.

Sämtliche vorliegende Ergebnisse aus Kapitel 5 sind das Resultat numerischer Simulationen. Wie bei den meisten technischen Fragestellungen bestehen Abweichungen zwischen den Ergebnissen numerischer Simulationen und den Ergebnissen physikalischer Experimente. Es wäre daher sinnvoll, die hier vorgestellten Metho-

den und Verfahren auf eine reale Einheit anzuwenden, um zu überprüfen, welche Aussagen bzgl. der maximalen Nutzungsdauer und der Zuverlässigkeitskenngröße sich decken und welche Aussagen einer intensiven Nachbetrachtung bedürfen. Eine Anwendung der Methodik auf eine Einheit, die unter realen Bedingungen betrieben wird, sollte im Anschluss daran die noch bestehenden Differenzen zwischen physikalischem Experiment und Realität aufzeigen. Auf Grund der oben bereits erwähnten notwendigen hohen Zahl an Eingangsgrößen wären die letztgenannten Untersuchungen mit einem nicht zu vernachlässigenden Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Hinzu kommt, dass für eine stochastische Auswertung eine größere Zahl an Daten benötigt werden, die bis zum Ausfall einer Einheit aufgezeichnet werden müssten. Da die Ausfälle von Einheiten ein seltenes, aber kostspieliges oder für Mensch, Maschine und Umwelt gefährliches Ereignis darstellen und in der Praxis bei laufender Einheit üblicherweise vermieden werden bzw. die Informationen über diese Ausfälle nur während der Garantiephase verfügbar sind, muss in diesem Fall die Repräsentativität der Stichproben überprüft werden und die Modellbildung mit zensierten Daten erfolgen.

Daher ist die vorliegende Arbeit als Grundlage und Ausgangspunkt der oben aufgeführten weiteren Forschungsansätze einzuordnen.

Literaturverzeichnis

- [Abicht u. a. 2001] ABICHT, C. ; BORMANN, J. ; MÜLLER, P.C. ; SÖFFKER, D. ; ULBRICH, H.: Model-Based Estimation of Impact Forces affecting Elastic Structures: Simulation and Experiment. In: *Proc. 18th ASME-DECT Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, Symposium on Vibration Including Friction and Impacts*. Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 9.–13. Sept. 2001
- [Alt 2002] ALT, Walter: *Nichtlineare Optimierung - Eine Einführung in Theorie, Verfahren und Anwendungen*. Braunschweig : Vieweg, 2002. – ISBN 3-528-03193-X
- [Amann 2000] AMANN, Patrick: *Residuengenerierung für die Fehlerdiagnose mittels fuzzy-relationaler Ausgangsschätzung*. Duisburg, Gerhard-Mercator Universität Duisburg, Dissertation, Oktober 2000. – Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 683
- [Ayyub u. a. 2002] AYYUB, Bilal M. ; ASSAKKAF, Ibrahim A. ; KIHLE, David p. ; SIEV, Michael W.: Reliability-Based Design Guidelines for Fatigue of Ship Structures. In: *Naval Engineers Journal* 114 (2002), Nr. 2, S. 113–138
- [Bertsche u. Lechner 2004] BERTSCHE, Bernd ; LECHNER, Gisbert: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin : Springer, 2004. – ISBN 3-540-20871-2
- [Betschon u. Birka 1980] BETSCHON, F. ; BIRKA, B: Lebensdauerüberwachung und -prognose an Nutzfahrzeugen mit Hilfe von Ermüdungs-Mess-Streifen. In: *XVIII. Internationaler Congress FISITA 1980 Transportsysteme, Nutzfahrzeuge, Hamburg*, 1980 (VDI-Berichte 367), S. 181–188
- [Bihler u. a. 2006] BIHLER, Eckardt ; VERMEIRE, Bert ; GOODMAN, Doug: *Lebensdauer-Monitoring auf dem Chip, Integrierte Elemente überwachen die Zuverlässigkeit*. Version: 2006. <http://www.elektroniknet.de/index.php?id=1997>, Abruf: 23.10.2006
- [Bogdanoff 1978a] BOGDANOFF, J.L.: A New Cumulative Damage Model, Part I. In: *J. appl. Mech.* 45 (1978), S. 246–250
- [Bogdanoff 1978b] BOGDANOFF, J.L.: A New Cumulative Damage Model, Part II. In: *J. appl. Mech.* 45 (1978), S. 251–257
- [Bogdanoff 1978c] BOGDANOFF, J.L.: A New Cumulative Damage Model, Part III. In: *J. appl. Mech.* 45 (1978), S. 733–739
- [Boller u. Biemans 1997] BOLLER, C. ; BIEMANS, C.: Strutural Health Monitoring in Aircraft – State-of-the-Art, Perspectives and Benefits. In: CHANG, Fu-Kuo (Hrsg.): *Strutural Health Monitoring, Current Statuts and Perspectives, Proceedings of the International Workshop on Strutural Health Monitoring, Stanford*

- University, CA, September 18-20, 1997.* Lancaster, PA : Technomic Publishing Co., Inc., 1997, S. 541–552
- [Börner u. Isermann 2003] BÖRNER, M. ; ISERMANN, R.: Supervision, fault detection, and sensor fault tolerance of passenger cars. In: *SAFEPROCESS 2003, IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes.* Washington, USA, Juni 2003, S. 327–334
- [Broutman u. Sahu 1972] BROUTMAN, L. J. ; SAHU, S.: A new damage theory to predict cumulative fatigue damage in fibreglass reinforced plastics. In: *Composite Materials: Testing and Design (Second Conference)* American Society for Testing and Materials, 1972 (ASTM STP 497), S. 170–188
- [Carter 1986] CARTER, A.D.S.: *Mechanical Reliability.* 2nd Ed. London : Macmillan, 1986. – ISBN 0–333–40587
- [Chinnam 1999] CHINNAM, Ratna B.: On-line Reliability Estimation of Individual Components, Using Degradation Signals. In: *IEEE Trans. on Reliability* 48 (1999), Nr. 4, S. 403–411
- [Chinnam 2002] CHINNAM, Ratna B.: On-line Reliability Estimation for Individual Components Using Statistical Degradation Signal Models. In: *Qual. Reliab. Engng. Int.* 18 (2002), S. 53–73
- [Chinnam u. Mohan 2002] CHINNAM, Ratna B. ; MOHAN, P.: On-Line Reliability Estimation of Physical Systems Using Neural Networks and Wavelets. In: *Smart Engineering System Design* 4 (2002), S. 253–264
- [Corten u. Dolan 1956] CORTEN, H.T. ; DOLAN, T.I.: Cumulative Fatigue Damage. In: *Proceed. of the Inter. Conf. on Fatigue of Metals* IME and ASME, 1956, S. 235–246
- [Crandell u. Mark 1963] CRANDELL, S.H. ; MARK, W.D.: *Random Vibration in mechanical Systems.* New York : Academic Press, 1963. – ISBN 0–121–96750–6
- [Dahl 1978] Kapitel 10.4. In: DAHL, Winfried: *Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung.* Düsseldorf : Verlag Stahleisen m.b.H., 1978, S. 261–276
- [Davison 1972] DAVISON, E.J.: The Output Control of Linear Time-Invariant Multivariable Systems with Unmeasurable Arbitrary Disturbances. In: *IEEE Trans. Automatic Control* 12 (1972), S. 561–573
- [Deckert 1998] DECKERT, Michael W.: *Physics of Failure, A Science-Based Approach to Ultra-High Reliability.* Version: 1998. <http://www.dau.mil/pubs/pm/pmpdf94/decker.pdf>, Abruf: 28.07.2006
- [Degrieck u. Paepegem 2001] DEGRIECK, Joris ; PAEPEGEM, Wim V.: Fatigue Damage Modelling of Fibre-reinforced Composite Materials: Review. In: *Applied Mechanics Review* 54 (2001), Nr. 4, S. 279–300

- [Denson u. a. 2005] DENSON, Bill ; MAHAR, Dave ; NICHOLS, David: *PRISM - System Reliability Assessment Software Tool*. Alion Science and Technology. <http://src.alionscience.com/prism/>. Version:1.5, März 2005, Abruf: 24.07.2006. – Softwareprogramm. Betriebssystem Windows 95, 98, 2000, NT 4.0 oder XP. Ab Juni 2006 fortgeführt als 217Plus von RIAC.
- [Dietl u. Rakowsky 2005] DIETL, Clemens ; RAKOWSKY, Uwe K.: Reliability-adaptive tool change management of transfer lines. In: KOLOWROCKI, Krzysztof (Hrsg.): *Advances in Safety and Reliability - ESREL 2005* -, 2005, S. 453–458
- [DIN 31051 2003] Norm DIN 31051 Juni 2003. *Grundlagen der Instandhaltung*
- [DIN 55350-22 1987] Norm DIN 55350-22 Februar 1987. *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik - Begriffe der Statistik - Spezielle Wahrscheinlichkeitsverteilungen*
- [DIN EN 60300-1 2004] Norm DIN EN 60300-1 Februar 2004. *Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 1: Zuverlässigkeitsmanagementsysteme*
- [DIN EN 61709 1999] Norm DIN EN 61709 Januar 1999. *Bauelemente der Elektronik - Zuverlässigkeit - Referenzbedingungen für Ausfallraten und Beanspruchungsmodelle zur Umrechnung*
- [DIN EN ISO 8402 1995] Norm DIN EN ISO 8402 August 1995. *Qualitätsmanagement. Anmerkungen zu Begriffen*
- [Dresig u. a. 1999] DRESIG, H. ; FIEDLER, L. ; ZSCHIESCHANG, T.: Aspekte der Schwingungsdiagnose bei Mechanismen. In: *VDI-Schwingungstagung'99 - Schwingungsüberwachung und -diagnose von Maschinen und Anlagen*. Frankenthal, 27.–28. Mai 1999 (VDI Berichte 1466), S. 477–492
- [Esztergar 1972] ESZTERGAR, E.P.: Creep Fatigue Interaction and Cumulative Damage Evaluation for Type 304 Stainless Steel / Oak Ridge National Laboratory. 1972 (ORNL-4757). – Forschungsbericht
- [Eulitz u. Kotte 1997] EULITZ, Klaus G. ; KOTTE, Karl L.: Das Nennspannungskonzept: Die Ermüdungslebensdauer vorhersagen. In: *MP Materialprüfung* 39 (1997), S. 134–140
- [Fong 1982] FONG, J. T.: What is Fatigue Damage? In: *Damage in Composite Materials* American Society for Testing and Materials, 1982 (ASTM STP 775), S. 243–266
- [Frank 1994] FRANK, Paul M.: Diagnoseverfahren in der Automatisierungstechnik. In: *at - Automatisierungstechnik* 42 (1994), Nr. 2, S. 47–63
- [Frank 1996] FRANK, Paul M.: Analytical and Qualitative Model-based Fault Diagnosis - A Survey and Some Results. In: *European Journal of Control* 2 (1996), S. 6–28

- [Frank u. a. 2000] FRANK, Paul M. ; DING, S.X. ; MARCU, T.: Model-based diagnosis in technical processes. In: *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 22 (2000), Nr. 1, S. 57–101
- [Freudenthal u. Gumbel 1956] FREUDENTHAL, A.M. ; GUMBEL, E.J.: Physical and Statistical Aspects of Fatigue. In: *Advances in Applied Mechanics* 4 (1956), S. 117–158
- [Gaßner 1939] GASSNER, E.: Festigkeitsversuche mit wiederholter Beanspruchung im Flugzeugbau. In: *Luftwissen* 6 (1939), S. 61–64
- [Gao u. Patton 2003] GAO, Y. ; PATTON, R.J.: Application of wavelet analysis for performance monitoring and diagnosis of a hydraulic pump. In: *SAFEPROCESS 2003, IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. Washington, USA, Juni 2003, S. 341–346
- [García 1999] GARCÍA, Efraín A.: *Modellgestützte Residuengenerierung für die Diagnose von additiven und multiplikativen Fehlern in dynamischen Systemen*. Duisburg, Gerhard-Mercator Universität Duisburg, Dissertation, Juli 1999. – Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 - Nr. 781
- [Gatts 1961] GATTS, R.R.: Application of a Cumulative Damage Concept to Fatigue. In: *Transac. of the ASME* 83 (1961), S. 529–540
- [Geropp 1995] GEROPP, Bernd: *Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der Hüllkurvenanalyse*. Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 1995
- [Gertler 1998] GERTLER, J.J.: *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. New York : Dekker, 1998. – ISBN 0–824–79427–3
- [GJB/z 299B 2001] Norm GJB/z 299B Mai 2001. *Reliability Calculation Model for Electronic Equipment*. – englische Übersetzung
- [Glasstone u. Eyring 1941] GLASSTONE, Laidler K. J. S. ; EYRING, H. E.: *The Theory of Rate Processes*. New York : McGraw Hill, 1941
- [Gnilke 1980] GNILKE, Walter: *Lebensdauerberechnung der Maschinenelemente*. Berlin : Verlag Technik, 1980. – ISBN 3–446–13261–9
- [Haibach 1970] HAIBACH, Erwin: Modifizierte lineare Schadensakkumulations-Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung. / Laboratorium für Betriebsfestigkeit. Darmstadt, 1970 (TM 50/70). – Technische Mitteilung des LBF
- [Haibach 2002] HAIBACH, Erwin: *Betriebsfestigkeit*. 2. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 2002. – ISBN 3–540–43142–X
- [Hallberg u. Peck 1991] HALLBERG, Ö ; PECK, D. S.: Recent Humidity Accelerations, a Base for Testing Standards. In: *Quality and Reliability Engineering International* 7 (1991), S. 169–180

- [Han u. Frank 1996] HAN, Z. ; FRANK, Paul M.: Application of parameter estimation based FDI to an industrial actuator benchmark. In: *Workshop on Advanced Control Systems*, 1996, S. 7–14
- [Harting 1966] HARTING, Darrell R.: The S/N-Fatigue-life gage: A direct means of measuring cumulative fatigue damage. In: *Experimental Mechanics* 6 (1966), Nr. 2, S. 19A–24A
- [Hashin 1983] HASHIN, Z.: Statistical Cumulative Damage Theory for Fatigue Life Prediction. In: *J. appl. Mech.* 50 (1983), S. 571–579
- [Hashin u. Rotem 1978] HASHIN, Z. ; ROTEM, A.: A New Cumulative Damage Theory of Fatigue Failure. In: *Materials Science and Engineering* 34 (1978), S. 147–160
- [Haug u. a. 2004] Schutzrecht DE 102 57 793 A (22. 07. 2004). HAUG, J. ; KÖNIG, A. ; WALLASCHEK, J. ; WEDMAN, S. (Erfinder); Daimler Chrysler AG (Anmelder). - Offenlegungsschrift
- [Hück u. a. 1990] HÜCK, E. ; BERGMANN, J. ; SCHÜTZ, W.: Bewertung der Schwingfestigkeit der mikrolegierten Stähle 27 MnVS6 und 38MnVS5. / Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft. Ottobrunn, 1990 (TF-2804/2). – IABG-Bericht. – 5. Band II: Versuche
- [Henry 1955] HENRY, D.L.: A Theory of Fatigue-Damage Accumulation in Steel. In: *Transac. of the ASME* 77 (1955), S. 913–918
- [Hippe u. Wurmthaler 1985] HIPPE, P. ; WURMTHALER, C.: *Zustandsregelung: theoretische Grundlagen und anwendungsorientierte Regelungskonzepte*. Berlin : Springer Verlag, 1985. – ISBN 3–540–15282–2
- [HRD5 1994] *HRD5 -Handbook of Reliability Data for Electronic Components Used in Telecommunication Systems*. London Information LTD., 1994
- [Huang 2000] HUANG, Yada: Neues Verfahren zur Schadensakkumulation. In: *Hebezeuge und Fördermittel* 40 (2000), S. 240–243
- [Hwang u. Han 1986] HWANG, W ; HAN, K.S.: Cumulative Damage Models and Multi-Stress Fatigue Life Prediction. In: *Journal of Composite Materials* 20 (1986), S. 125–153
- [IEEE Std-493 1991] Norm IEEE Std-493 (The Goldbook) Mai 1991. *Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems/Std 493-1991*
- [IEV 191-2 1995] Norm IEV Kapitel 191-02 1995. *Zuverlässigkeit und Dienstgüte - Fähigkeiten eine Einheit*
- [IEV 191-4 1995] Norm IEV Kapitel 191-04 1995. *Zuverlässigkeit und Dienstgüte - Ausfälle*

- [Isermann 1997] ISERMANN, R.: Supervision, Fault-detection and Fault-diagnosis Methods - an Introduction. In: *Control Eng. Practice* 5 (1997), Nr. 5, S. 639–652
- [Jacoby 1969] JACOBY, G.: Lebensdauerversuche bei unregelmäßig schwankender Beanspruchung. In: *VDI-Z.* 5 (1969), Nr. 7, S. 63–90
- [Johnson u. Doner 1981] JOHNSON, S.E.J. ; DONER, M.: A Statistical Simulation Model of Miner's Rule. In: *Transac. of the ASME* 103 (1981), S. 112–117
- [Kapur u. Lamberson 1977] KAPUR, K.C. ; LAMBERSON, L.R.: *Reliability in Engineering Design*. New York : John Wiley & Sons, 1977. – ISBN 0–471–51191–9
- [Kim u. Kolarik 1992] KIM, Yon S. ; KOLARIK, William J.: Real-time conditional reliability prediction from on-line tool performance data. In: *Int. J. Prod Res.* 39 (1992), Nr. 8, S. 1822–1844
- [Kinnaert 2003] KINNAERT, Michel: Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems. A tutorial. In: *SAFEPROCESS 2003, IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. Washington, USA, Juni 2003, S. 37–50
- [de Kleer u. Williams 1987] KLEER, J. de ; WILLIAMS, B.C.: Diagnosing Multiple Faults. In: *Artificial Intelligence* 32 (1987), Nr. 1, S. 97–130
- [Kolerus 2000] KOLERUS, J.: *Zustandsüberwachung von Maschinen*. Renningen : Expert Verlag, 2000. – ISBN 3–816–92597–9
- [Koren u. Krishna 2007] KOREN, Israel ; KRISHNA, C. M.: *Fault-Tolerant Systems*. San Francisco, CA : Morgan-Kaufman, 2007. – ISBN 0–120–88525–5
- [Koslow u. Uschakow 1979] KOSLOW, B. A. ; USCHAKOW, I.A. ; REINSCHKE, Kurt (Hrsg.): *Handbuch zur Berechnung der Zuverlässigkeit für Ingenieure*. München : Carl Hanser Verlag, 1979. – ISBN 3–446–12546–9
- [Kotte u. Eulitz 1995] KOTTE, K.L. ; EULITZ, K.-G.: Überprüfung der Festlegung zur Abschätzung von Wöhlerlinien und zur Schadensakkumulations-Rechnung anhand einer Datensammlung gesicherter Versuchsergebnisse. In: *Festigkeitsbericht, Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile* VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, VDI, 1995 (VDI Berichte 1227), S. 103–124
- [Kotz u. a. 2003] KOTZ, Samuel ; LUMELSKII, Yan ; PENSKY, Marianna: *The Stress-Strength Model and its Generalizations*. Singapur : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003. – ISBN 9–812–38057–4
- [Krajcin u. Söffker 2003] KRAJCIN, Idriz ; SÖFFKER, Dirk: Modified PIO Design for Robust Unknown Input Estimation. In: *2003 ASME DETC Conferences*. Chicago, IL USA, 2.–6. Sept. 2003
- [Kuipers 1986] KUIPERS, B.J.: Qualitative Simulation. In: *Artificial Intelligence* 29 (1986), Nr. 3, S. 289–338

- [Kutt u. Bieniek 1988] KUTT, Tiiu V. ; BIENIEK, M.P.: Cumulative Damage and Fatigue Life Prediction. In: *AIAA Journal* 26 (1988), Feb., Nr. 2, S. 213–219
- [Lehmann 1997] LEHMANN, P.: Schnelle Zeit-Frequenz-Analyse auf der Grundlage der Kurzzeit-Fourier-Transformation. In: *tm - Technisches Messen* 6 (1997), S. 247
- [Leitch u. Shen 1993] LEITCH, R. ; SHEN, Q.: Qualitative model based diagnosis of continuous dynamic systems. In: *IEEE Conference Publication 1993*, 1993, S. 147ff.
- [Lemaitre u. Plumtree 1979] LEMAITRE, J. ; PLUMTREE, A.: Application of Damage Concepts to predict Creep-Fatigue Failures. In: *J. of Eng. Maths. and Tech.* 101 (1979), S. 284–292
- [Lu u. a. 2001] LU, S ; LU, H ; KOLARIK, W.J.: Multivariate performance reliability prediction in real-time. In: *Reliability Engineering & System Safety* 72 (2001), S. 39–45
- [Maisch u. a. 2005] MAISCH, M. ; BERTSCHE, B. ; HETTICH, R.: An Approach for Online Reliability Evaluation and Prediction of Mechanical Transmission Components. In: KOLOWROCKI, Krzysztof (Hrsg.): *Advances in Safety and Reliability - ESREL 2005*, 2005, S. 1325–1333
- [Manson u. a. 1967] MANSON, S.S. ; FRECHE, J.C. ; ENSIGN, C.R.: Application of a Double Linear Damage Rule to Cumulative Fatigue. In: ASME (Hrsg.): *Symposium on Crack Propagation, Atlantic City, NJ, June 26 - July 1, 1966*, 1967 (ASME STP 415), S. 384–412
- [Manz 1998] MANZ, Susanne: Qualitative Modellierung komplexer dynamischer Systeme. In: *5. Berichtskolloquium des GKPVS*, 1998
- [Marco u. Starkey 1954] MARCO, S.M. ; STARKEY, W.L.: A Concept of Fatigue Damage. In: *Transac. of the ASME* 76 (1954), S. 626–662
- [Marin 1962] MARIN, Joseph: *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*. Prentice-Hall, Inc., 1962
- [Matthews 1999] MATTHEWS, F.L: Damage in Fibre-Reinforced Plastics: Its Nature, Consequences and Detection. In: GILCHRIST, M.D. (Hrsg.) ; DULIEU-BARTON, J.M. (Hrsg.) ; WORDEN, K. (Hrsg.): *Damage Assessment of Structures, DAMAS 99, Proceedings of the International Conference on Damage Assessment of Structure (DAMAS 99)*. Dublin, Ireland, 28.–30. Juni 1999, S. 1–15
- [Meyna u. Pauli 2003] MEYNA, Arno ; PAULI, Bernhard ; BRUNNER, Franz J. (Hrsg.): *Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik*. München : Carl Hanser Verlag, 2003. – ISBN 3-446-21594-8
- [MIL 217 1995] Norm MIL-HDBK-217F 1995. *Reliability prediction of electronic equipment - Military Handbook-217*

- [Min u. a. 1995] MIN, Laio ; XIAOFEI, Xu ; QING-XIONG, Yang: Cumulative fatigue damage dynamic interference statistical model. In: *Inf. J. Fatigue* 17 (1995), Nr. 8, S. 559–566
- [Miner 1945] MINER, M.A.: Cumulative Damage in Fatigue. In: *J. appl. Mech.* 12 (1945), S. 159–164
- [Müller 1989] MÜLLER, P.C.: Indirect Measurement of Nonlinear Effects by State Observers. In: *Proc. of the IUTAM Symposium on Nonlinear Dynamics in Engineering Systems*. University of Stuttgart, 21.–25. Aug. 1989
- [Morrow 1986] MORROW, J.D.: The effect of selected sub-cycle sequences in fatigue loading histories. In: *Random Fatigue Life Prediction* Bd. 72, 1986 (ASME Publication PVP), S. 43–60
- [Natke 1998] NATKE, Hans G.: *Einführung in die Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse*. 3., überarb. Aufl. Braunschweig : Vieweg, 1998 (Grundlagen und Fortschritte der Ingenieurwissenschaften). – ISBN 3–528–28145–6
- [NPRD 1995] *NPRD-95 - Nonelectronic Parts Reliability Data*. New York : Alion System Reliability Center, März 1995
- [NSWC 1998] Norm NSWC 98/LE1 September 1998. *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*
- [Owen u. Howe 1971] OWEN, M.J. ; HOWE, R.J.: The Accumulation of Damage in a Glass-Reinforced Plastic under Tensile and Fatigue Loading. In: *J. of Phys. D* 5 (1971), S. 1637–1649
- [Özbek u. Söffker 2006] ÖZBEK, Markus ; SÖFFKER, Dirk: Feature-based fault detection approaches. In: *Proc. of the 3rd IEEE International Conference of Mechatronics (ICM'06)*. Budapest, Ungarn, 3.–5. Juli 2006, S. 342–347
- [Pabst 2005] PABST, Ilona: *On Modeling, Analysis, and Synthesis of Generalized Reliability Control Systems*, Universität Wuppertal, Diss., 2005
- [Palmgren 1924] PALMGREN, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. In: *VDI-Z.* 68 (1924), S. 339–341
- [Pardalos u. Romeijn 2002] PARDALOS, P.M. (Hrsg.) ; ROMEIJN, H.E. (Hrsg.): *Handbook of Global Optimization*. Berlin : Springer, 2002. ISBN 1–402–00632–2
- [Parzan 1959] PARZAN, E.: On Models for the Probability of Fatigue Failure of a Structure / AGRAD Rept. 1959 (245). – Forschungsbericht
- [Patton u. a. 2000] PATTON, R.J. ; UPPAL, F.J. ; LOPEZ-TORIBIO, C.J.: Soft Computing Approaches to Fault Diagnosis for Dynamic Systems: A Survey. In: *SAFEPROCESS 2000, 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, 2000, S. 298–311. – Band 1

- [Pecht 1990] PECHT, M.: The reliability physics approach to failure prediction modeling. In: *Quality and Reliability Engineering Int.* 6 (1990), S. 267–273
- [Petryna u. Krätzig 1999] PETRYNA, Y. ; KRÄTZIG, W.B.: Damage indicators and reliability estimates of deteriorating RC structures. In: SCHUËLLER (Hrsg.) ; KAFKA (Hrsg.): *Safety and Reliability*, 1999
- [Place u. a. 1999] PLACE, C.S ; STRUTT, J.E. ; ALLSOPP, K. ; IRVING, P.E. ; TRILLE, C: Reliability Prediction of Helicopter Transmission Systems using Stress-Strength Interference with Underlying Damage Accumulation. In: *Quality and Reliability Engineering International* 15 (1999), S. 69–78
- [Rackwitz 1977] RACKWITZ, Rüdiger: First Order Reliability Theories and Stochastic Models. In: *Proceedings of the ICOSSAR '77, TU München*. München, 1977
- [Rakowsky u. Söffker 1996] RAKOWSKY, Uwe K. ; SÖFFKER, Dirk: Verknüpfung von Methoden der Regelungstheorie und der Technischen Zuverlässigkeit zur Modellierung dynamischer Systeme. In: *VDI-GMA Jahrestagung der Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik* Bd. 1282, 1996 (VDI Berichte), S. 753–763
- [Rakowsky u. Söffker 1997] RAKOWSKY, Uwe K. ; SÖFFKER, Dirk: Real-Time Reliability Evaluation of Vibrating Mechanical Structures. In: *Proc. 12th ASME Conference on Reliability, Stress Analysis and Failure Prevention*, 1997, S. 625–636
- [RAMS 2004] *Analysen und Verfahren - Zuverlässigkeitsvorhersagen*. Version: 2004. <http://www.ramssoft.info/beratung/zuverlaessigkeit.html>, Abruf: 24.09.2006
- [Rückwald 1993] RÜCKWALD, Rainer: *Modellgestützte Überwachung mechanischer Systeme mittels differentieller Parameteridentifikation*. Düsseldorf : VDI, 1993. – ISBN 3–18–142808–6. – VDI Fortschritt-Berichte Reihe 7 Nr. 328
- [Reiter 1987] REITER, R.: Theory of Diagnosis from First Principles. In: *Artificial Intelligence* 32 (1987), S. 57–96
- [Rekha u. Shyam Sunder 1997] REKHA, A. ; SHYAM SUNDER, T.: Survival Function of a Component Under Random Strength Attenuation. In: *Microelectronic Reliab.* 37 (1997), Nr. 4, S. 677–682
- [Ridgetop Group 2005] RIDGETOP GROUP, Inc. (Hrsg.): *Sentinel Silicon™, Application Guide*. Version: 2005. http://www.ridgetop-group.com/docs/Sentinel%20Silicon_Application_Guide_Feb_2005.pdf, Abruf: 23.10.2006
- [Robinson 1952] ROBINSON, C.L.: Effect of Temperature Variation on the long-time Rupture Strength of Steels. In: *Transac. of the ASME* 74 (1952), S. 777–781

- [Schlottmann 1995] SCHLOTTMANN, Dietrich: *Auslegung von Konstruktionselementen - Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit im Maschinenbau*. 2. Auflage. Berlin : Springer, 1995. – ISBN 3-540-42778-3
- [Schneidersmann 1986] SCHNEIDERSMANN, E.O.: On-line Erfassung der Bauteilschädigung dynamisch beanspruchter Systeme. In: *f + h - fördern und heben* 36 (1986), Nr. 3, S. 158–159
- [Schott 1997] SCHOTT, Günter: *Werkstoffermüdung - Ermüdungsfestigkeit*. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997. – ISBN 3-342-00511-4
- [Schütz 1972] SCHÜTZ, W.: AGARD-CP-118, The Fatigue Life under Three Different Load Spectra-Test and Calculations. In: *Symposium on Random Load Fatigue*. Lyngby, Dänemark, 1972
- [Schwarte u. a. 2003] SCHWARTE, A. ; KIMMICH, F. ; ISERMANN, R.: Model-based fault detection of a diesel engine with turbo charger - A case study. In: *SAFE-PROCESS 2003, IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. Washington, USA, Juni 2003, S. 301–314
- [Söffker 1996] SÖFFKER, Dirk: Fault detection using Proportional - Integral Observer for application to elastic mechanical structures. In: *Proc. IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications CESA'96*. Lille, France, Juli 9–12 1996, S. 522–527
- [Söffker 1997] SÖFFKER, Dirk: Robust fault detection of large vibrating structures by the means of control theory. In: PUSEY, H.C. (Hrsg.) ; Proc. 12th ASME Conference on Reliability, Stress Analysis and Failure Prevention (Veranst.): *A Critical Link: Diagnosis to prognosis. A publication of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*. Virginia Beach, April 1997, S. 751–762
- [Söffker 1999a] SÖFFKER, Dirk: Überwachung, Diagnose und lebensdaueroptimierende Betriebsführung schwingungsfähiger Maschinen - Teil 2: Entwicklung lebensdauer- und belastungsabhängiger Ausfallraten im SRCE-Konzept. In: *VDI Schwingungstagung 1999* Bd. 1466, 1999 (VDI Berichte), S. 627–638
- [Söffker 1999b] SÖFFKER, Dirk: Observer-based measurement of contact forces of the nonlinear rail-wheel contact as a base of advanced traction control. In: WALLASCHEK, J. (Hrsg.) ; LÜCKEL, J. (Hrsg.) ; LITTMANN, W. (Hrsg.): *Mechatronics and Advanced Motion Control, Proc. of 3rd International Heinz Nixdorf Symposium* Bd. 49, 1999 (HNI-Verlagsschriftenreihe), S. 305–320
- [Söffker 2000] SÖFFKER, Dirk: Zur Online-Bestimmung von Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen innerhalb des SRCE-Konzepts. In: *at - Automatisierungstechnik* 48 (2000), Nr. 8, S. 383–391

- [Söffker 2001a] SÖFFKER, Dirk: Monitoring and Control of Reliability Characteristics as a Base for Safe and Economical Operating of Technical Systems. In: *Proc. of 3rd Int. Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University*. Stanford, CA, 12.–14. Sept. 2001
- [Söffker 2001b] SÖFFKER, Dirk: A novel strategy for reliability-based failure avoidance of operating technical systems. In: *Proceedings of DETC'01, ASME 2001 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference*. Pittsburgh, PA, 9.–12. Sept. 2001
- [Söffker u. a. 2005a] SÖFFKER, Dirk ; KASHI, Keiwan ; WOLTERS, Krischan: Entwurf ausfallsicherer Systeme durch die Integration von zuverlässigkeitstechnischen Konzepten, Diagnoseverfahren und modernen Regelungsstrategien. In: *atp* 47 (2005), Nr. 7, S. 90–94
- [Söffker u. a. 2005b] SÖFFKER, Dirk ; KRAJCIN, Idriz ; WOLTERS, Krischan: Fault Tolerant design and improved availability of active composite elastic structures. In: *Proceedings of SPIE, Smart Structure and Material 2005, Smart Structure and Integrated Systems*. San Diego, CA, 7.–10. März 2005, S. 522–529
- [Söffker u. Müller 1995] SÖFFKER, Dirk ; MÜLLER, P.C.: Betriebsüberwachung und Schadendiagnose. In: IRRETIER, H. (Hrsg.) ; NORDMANN, R. (Hrsg.) ; SPRINGER, H. (Hrsg.): *Schwingungen in rotierenden Maschinen*. Kaiserslautern, 2./3. März 1995, S. 85–93
- [Söffker u. Rakowsky 1997] SÖFFKER, Dirk ; RAKOWSKY, Uwe K.: Perspectives of Monitoring And Control of Vibrating Structures by Combining New Methods of Fault Detection With New Approaches of Reliability Engineering. In: *Proc. 12th ASME Conference on Reliability, Stress Analysis and Failure Prevention*, 1997, S. 671–682
- [Söffker u. Rakowsky 1998] SÖFFKER, Dirk ; RAKOWSKY, Uwe K.: Perspektiven regelungs- und zuverlässigkeitstheoretischer Methoden zur Überwachung dynamischer Systeme aus sicherheitstechnischer Sicht. In: *at - Automatisierungstechnik* 46 (1998), S. 295–301
- [Söffker u. Rinne 1999] SÖFFKER, Dirk ; RINNE, Matthias: The application of the SRCE-concept for monitoring high speed automotive tires. In: SCHUELLER (Hrsg.) ; KAFKA (Hrsg.): *Safety and Reliability*, 1999, S. 1083–1088
- [Söffker u. Wolters 2006] SÖFFKER, Dirk ; WOLTERS, Krischan: Ein Ansatz zur ausfallvermeidenden Betriebsführung hochintegrierter adaptronischer Systeme. In: *DVM-Bericht 901, Zuverlässigkeit mechatronischer und adaptronischer Systeme, 1. Tagung DVM-Arbeitskreis Zuverlässigkeit mechatronischer und adaptronischer Systeme* Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 2006, S. 135–145

- [Söffker u. a. 1995] SÖFFKER, Dirk ; YU, T.-J. ; MÜLLER, P.C.: State Estimation of Dynamical Systems with Nonlinearities by using Proportional-Integral Observer. In: *International Journal of Systems Science* 26 (1995), Nr. 9, S. 1571–1582
- [Shimokawa u. Hamaguchi 1987] SHIMOKAWA, Toshiyuki ; HAMAGUCHI, Yasumasa: Statistical Evaluation of Fatigue Life and Fatigue Strength in Circular-Hole Notched Specimens of a Carbon Eight-Harness-Satin/Epoxy Laminate. In: T.TANAKA (Hrsg.) ; NISHIJIMA, S. (Hrsg.) ; ICHIKAWA, M. (Hrsg.): *Current Japanese Material Research* Bd. 2. London : Elsevier Applied Science, 1987
- [SHM 2002] *Structural Health Monitoring*. Thousand Oaks, CA, USA : SAGE Publications, 2002-2007
- [Simoni 1999] SIMONI, Luciano: A general Phenomenological Life Model for Insulating Materials und Combined Stresses. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation* 6 (1999), Nr. 2, S. 250–258
- [Simoni u. a. 1993] SIMONI, Luciano ; MAZZANTI, G. ; MONTANARI, G.C. ; LEFEBRE, L.: A General Multi-stress Life Model for Insulating Materials with or without Evidence for Thresholds. In: *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 28 (1993), Juni, Nr. 3, S. 349–364
- [Skerl u. a. 1994] SKERL, O. ; SCHMIDT, W. ; SPECHT, O.: Wigner-Verteilung als Werkzeug zur Zeit-Frequenz-Analyse nichtstationärer Signale. In: *tm - Technisches Messen* 161 (1994), S. 7–15
- [Srivatsavan u. Subramanyan 1978] SRIVATSAVAN, P. ; SUBRAMANYAN, S.: A Cumulative Damage Rule based on Successive Reduction in Fatigue Limit. In: *J. of Eng. Maths. and Tech.* 100 (1978), S. 212–214
- [Stearns u. Hush 1999] STEARNS, S. ; HUSH, D.: *Digitale Verarbeitung analoger Signale*. 7., durchgesehene Auflage. München : Oldenbourg, 1999. – ISBN 3–486–24528–7
- [Stockmanns 2000] STOCKMANN, G.: *Wavelet-Analyse zur Detektion von Zustandsänderungen*. Duisburg, Gerhard Mercator Universität Duisburg, Diss., 2000. – VDI Fortschritt-Berichte Reihe 17 Nr. 202
- [Strassmann 2004] STRASSMANN, Burkhard: Dynamische Nebeneffekte in der neuen Rumpelbahn. In: *Die Zeit* (2004), 3. Juni, Nr. 24, S. 38
- [Struss u. Dressler 1989] STRUSS, P. ; DRESSLER, O.: Physical Negation: Integrating Fault Models into the General Diagnostic Engine. In: *Proc. 11th Joint Conf. on Artificial Intelligence*, 1989, S. 1318–1323
- [Subramanyan 1976] SUBRAMANYAN: A Cumulative Rule based on the Knee Point of the S-N Curve. In: *Trans. ASME J. of Eng. Maths. and Tech.* 98 (1976), S. 316–321

- [Taira 1960] TAIRA, S.: Lifetime of Structures Subjected to Varying Load and Temperature. In: *Colloquium on Creep in Structures*. Stanford University (California), 1960
- [Talmor 1999] TALMOR, Michael: Integrated reliability prediction methodology - Principles and practice. In: SCHUËLLER (Hrsg.) ; KAFKA (Hrsg.): *Safety and Reliability*, 1999
- [Tang u. Zhao 1995] TANG, Jun ; ZHAO, Jie: A practical approach for predicting fatigue reliability under random cyclic loading. In: *Reliability Engineering and System Safety* 50 (1995), S. 7–15
- [Taylor 1907] TAYLOR, F.W.: On the Art of cutting metals. In: *Trans. Am. Soc. mech.* 28 (1907), S. 31–279
- [Telcordia SR-332 2001] *Telcordia Technologies Special Report SR-332, Reliability Predictions Methodologies for Electronic Equipment*. New Jersey : Telcordia Customer Service, Mai 2001
- [VDI 4004 1986] Norm VDI 4004-2 August 1986. *Zuverlässigkeitskenngrößen, Überlebenskenngrößen*
- [Wedmann u. Wallaschek 2001] WEDMANN, S. ; WALLASCHEK, J.: Condition Monitoring in mechatronischen Systemem am Beispiel des Lebensdauerbeobachters. In: *Schwingung in Antrieben und Maschinen*, 2001 (VDI-Berichte 1606)
- [Wöhler 1863] WÖHLER, August: Über die Versuche zuer Ermittlung der Festigkeiten von Achsen, welche in den Werkstätten der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt a. d. O. angestellt sind. In: *Z. f. Bauwesen* 13 (1863), S. 233–258
- [Wolters u. Söffker 2003] WOLTERS, Krischan ; SÖFFKER, Dirk: Control of damage dependent online reliability characteristics to extend system utilization. In: *Proc. of the 4th Int. Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, CA, 15.–17. Sept. 2003, S. 796–804
- [Wolters u. Söffker 2004a] WOLTERS, Krischan ; SÖFFKER, Dirk: Diagnoseverfahren und Notlaufkonzepte mechatronischer Systeme / Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. 2004 (Forschungsbericht Nr. 408). – Abschlussbericht
- [Wolters u. Söffker 2004b] WOLTERS, Krischan ; SÖFFKER, Dirk: Improving systems availability by combining reliability and control engineering techniques. In: *2nd European Workshop of Structural Health Monitoring*. München, 7.–9. Juli 2004, S. 711–720
- [Wolters u. Söffker 2005a] WOLTERS, Krischan ; SÖFFKER, Dirk: An Approach to Affect the Probability of Failure by Changed Operation Modes. In: *Advances in Safety and Reliability, Volume II, Proceedings of the European Safety & Reliability Conference (ESREL 2005)*. Tri City, Poland, 27.–30. Juni 2005, S. 2047–2051

- [Wolters u. Söffker 2005b] WOLTERS, Krischan ; SÖFFKER, Dirk: The potential of the Safety and Reliability Control Engineering Concept as framework for reliability based utilization strategies. In: *Proc. of the 5th Int. Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, CA, 2005, S. 1353–1360
- [Zenner u. Liu 1992] ZENNER, H. ; LIU, J.: Vorschlag zur Verbesserung der Lebensdauerabschätzung nach dem Nennspannungskonzept. In: *Konstruktion* 44 (1992), S. 9–17